

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE DEPÓSITOS
DE SUELO CON ESTRATOS POTENCIALMENTE
LICUABLES NO SUPERFICIALES

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO AL PROGRAMA
ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Jose Humberto Zambrano Perafán
Octubre de 2019

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE DEPÓSITOS
DE SUELO CON ESTRATOS POTENCIALMENTE
LICUABLES NO SUPERFICIALES

ESTUDIANTE:
JOSE HUMBERTO ZAMBRANO PERAFÁN

DIRECTORES:
ALEJANDRO CRUZ ESCOBAR
SEBASTIÁN ARANGO SERNA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
OCTUBRE DE 2019

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo de grado fue aprobado por el director del programa académico, los directores de investigación y jurados.

Director del Programa de Ingeniería Civil y Geomática

ALEJANDRO CRUZ ESCOBAR
Director de Investigación

SEBASTIÁN ARANGO SERNA
Director de Investigación

JOHANNIO MARULANDA CASAS
Jurado

ANA MARÍA PARRA
Jurado

Ciudad y fecha

Resumen

La licuación es un fenómeno geotécnico en el que arenas saturadas sufren una pérdida total o parcial de su resistencia cortante ante sollicitaciones dinámicas, causando daño en las estructuras presentes o, en el peor de los casos, el colapso de edificaciones. Por lo anterior, en los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones con el fin de desarrollar modelos numéricos prácticos que permitan estimar, con un buen grado de precisión, la respuesta sísmica de depósitos de suelo con potencial de licuación. En Santiago de Cali, gran parte del oriente de la ciudad, al margen del río Cauca, se encuentran suelos con estratos potencialmente licuables no superficiales, donde se ubica una de las estructuras indispensables para la ciudad, la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Puerto Mallarino la cual abastece a más del 70% de la ciudad, aproximadamente. Es por esto de que el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G7) se encuentra desarrollando una propuesta metodológica que permita estimar de buena forma el comportamiento sísmico de este tipo de depósitos de suelo. No obstante, para esto es necesario definir el comportamiento real de este tipo de depósitos de suelos, que permita definir una base comparativa para el desarrollo de esta metodología. De esta forma, en la presente investigación se analizaron más de 1.800 registros de aceleración y más de 1.100 registros de presión correspondientes a los centros de monitoreo *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) y *Garner Valley Downhole Array* (GVDA), ubicados en California, EE. UU. Del análisis, se encontró que el PGA en superficie no presenta una variación significativa en la respuesta del depósito de suelo, mientras que la deformación cortante se incrementa a medida que el exceso de la presión de poros aumenta. De igual manera, se determinó que la respuesta del depósito de suelo puede estar determinado por las condiciones geotécnicas de los estratos de suelo adyacentes al estrato potencialmente licuable, las cuales pueden llegar a conducir grandes deformaciones cortantes debido a la degradación del estrato licuable. Además, se encontró una relación entre la intensidad de Arias y el aumento del exceso de la presión de poros, para lo que el análisis se extendió al estudio de los parámetros que inciden en el exceso de la presión de poros. De este último, se encontró que la Intensidad de Arias y la deformación cortante del estrato potencialmente licuable son parámetros que pueden definir, a través de una curva o función, un umbral que defina si, para un depósito de suelo, se inicia o no el exceso de la presión de poros.

Agradecimientos

A mi familia y a mi esposa, quienes son la columna de mi vida, por el gran apoyo y amor que me han dado desde el inicio de mi carrera, sin ellos no hubiera sido posible culminarla.

A mis directores, los profesores Alejandro Cruz Escobar y Sebastián Arango Serna, quienes me han brindado todo su conocimiento y experiencia para el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de trabajo Geociencias, Leonardo, Mauricio, Darwin, Jorge y Claudia; y a Johan, quienes han sido mis compañeros durante estos años y con los cuales he crecido personal y profesionalmente.

A mis amigos de carrera, Sebastián “El mono”, Camilo, Angie, Víctor, Bryan y Jenny, por todos estos años de risas, compartiendo juntos y aprendiendo.

Al grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7).

A la Universidad del Valle.

Este trabajo de grado fue financiado por COLCIENCIAS, mediante el proyecto de investigación “Evaluación de Métodos No Convencionales para la Determinación y Mitigación del Potencial de Licuación en Suelos” (código 11067-710-51485 | contrato FP44842-022-2016), con el apoyo del Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle.

Contenido

Ítem	Página
Resumen.....	iv
Agradecimientos.....	v
Contenido	vii
Listado de Tablas y Figuras	ix
Capítulo 1.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Descripción del problema	4
1.3. Formulación.....	4
1.4. Objetivos	5
1.5. Justificación.....	5
Capítulo 2.....	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Estado del Arte	10
Capítulo 3.....	17
3.1. Selección de los registros sísmicos de los centros de monitoreo	17
3.2. Estimación de las particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros	26
3.3. Evaluación de la incidencia de los parámetros sísmicos de intensidad en el inicio del exceso de la presión de poros.....	32
Capítulo 4.....	35
4.1. Selección de los registros sísmicos de los centros de monitoreo	35
4.2. Estimación de las particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros	42
4.3. Evaluación de la incidencia de los parámetros sísmicos de intensidad en el inicio del exceso de la presión de poros.....	55
Capítulo 5.....	64
5.1. Particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros	64

5.2.	Relaciones del análisis del inicio del exceso de la presión de poros	66
5.3.	Recomendaciones para futuras investigaciones	67
Capítulo 6.	69
Capítulo 7.	76

Listado de Tablas y Figuras

Ítem	Página
Tabla 1. Selección de piezómetros para análisis de <i>ru</i> en el centro WLA.	20
Tabla 2. Selección de piezómetros para análisis de <i>ru</i> en el centro GVDA.....	20
Tabla 3. Registros sísmicos utilizados para validación de rutina de procesamiento.	28
Tabla 4. Promedio de ajuste y desviación estándar.	28
Tabla 5. Piezómetros de referencia de los centros de monitoreo.	34
Tabla 6. Valores de variación del esfuerzo total en función del nivel de aguas freáticas para las profundidades de cada uno de los piezómetros del centro de monitoreo WLA.....	37
Tabla 7. Valores de los esfuerzos totales en cada una de las profundidades de los piezómetros del centro de monitoreo GVDA.....	39
Tabla 8. Tamaño definido para los centros de monitoreo WLA y GVDA.	40
Tabla 9. Registros sísmicos de WLA con <i>presión de poros considerable</i>	40
Tabla 10. Registros sísmicos de GVDA con <i>presión de poros considerable</i>	41
Tabla 11. Tamaño final de la muestra de los centros de monitoreo WLA y GVDA.....	41
Tabla 12. Valores de la mediana de los datos de Intensidad de Arias según el caso de análisis.....	57
Tabla 13. Valores de la mediana de los datos de deformación cortante según el caso de análisis.....	59

Ítem	Página
Figura 1. Respuesta sísmica del depósito de suelo de <i>Wildlife Liquefaction Array</i> (WLA) durante el sismo de <i>Superstition Hills</i> (1987).....	2
Figura 2. Espectros de respuesta obtenidos mediante registros sísmicos y modelos de respuesta sísmica unidimensionales. Adaptado de Youd y Carter (2005) y Kramer y otros (2011).....	3
Figura 3. Respuesta sísmica del depósito de suelo de <i>Wildlife Liquefaction Array</i> (WLA) durante el sismo de <i>Superstition Hills</i> (1987) con espectro de respuesta en pseudoaceleración. a. Deformación cortante promedio de los primeros 7.5 m de profundidad, y curva de la razón del exceso de la presión de poros a 2.9 m de profundidad, en el tope del estrato potencialmente licuable. b. Espectros de respuesta de pseudo-aceleración de la respuesta en superficie, y a 7.5m. Adaptado de Holzer y Youd (2007), y Bouckovalas y otros (2017).	9
Figura 4. Gráficos de los registros en aceleración en superficie (superior) y profundidad (inferior) en las componentes NS; y de la razón espectral de Stockwell tiempo-frecuencia.	10
Figura 5. Instrumentación en <i>Wildlife Liquefaction Array</i> (WLA). Adaptado de NEES@UCSB (2015).....	11
Figura 6. Instrumentación en <i>Garner Valley Donwhole Array</i> . Adaptado de NEES@UCSB (2015).....	13
Figura 7. Interfaz del portal web de NEES@UCSB. Adaptado de NEES@UCSB (2015).....	15
Figura 8. Objetivos metodológicos.....	17
Figura 9. Flujo de trabajo del primer objetivo metodológico.....	18
Figura 10. Metodología de obtención del exceso de la presión de poros máximo para un registro en WLA.	22
Figura 11. Metodología de obtención del exceso de la presión de poros máximo para un registro en GVDA.....	22

Figura 12. ru calculado según los datos piezométricos en un evento en WLA.....	23
Figura 13. ru calculado según los datos piezométricos en un evento en GVDA.....	23
Figura 14. Flujo de trabajo del segundo objetivo metodológico.	26
Figura 15. Comparación de la aplicación de la rutina <i>baseline correction</i> de los datos de aceleración del registro del 29 de abril de 2017 (Tabla 3) utilizando los resultados del software Deepsoil® y los obtenidos de la codificación.	29
Figura 16. Datos de desplazamiento del registro en aceleración del 29 de abril de 2017 (Tabla 3) utilizando los resultados del software Deepsoil® y los obtenidos de la codificación.....	30
Figura 17. Flujo de trabajo del tercer objetivo metodológico.	33
Figura 18. Curva de variación el nivel freático en el tiempo para el depósito de suelo del centro de monitoreo WLA.	36
Figura 19. Curva de variación el nivel freático en el tiempo para el depósito de suelo del centro de monitoreo GVDA.	36
Figura 20. Variación del esfuerzo total en función del nivel de aguas freáticas para las profundidades de cada uno de los piezómetros del centro de monitoreo WLA.	38
Figura 21. Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 registrados por WLA.....	39
Figura 22. Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 registrados por GVDA.	40
Figura 23. Relación de la magnitud sísmica ML y el PGA en la superficie del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este- oeste (EW).....	43
Figura 24. Relación de la aceleración máxima en la base del depósito, PGA en la base, y la aceleración máxima en superficie, PGA en superficie, del centro de monitoreo WLA en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).	46
Figura 25. Relaciones aproximadas entre la máxima aceleración en roca y las condiciones de sitio. Adaptado de Seed y otros (1976).....	47

Figura 26. Diagrama de cajas de la razón del PGA en superficie y en la base del estrato potencialmente licuable, para el centro de monitoreo WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).	48
Figura 27. Diagrama de cajas de la del PGA en superficie y en la base del estrato potencialmente licuable, para el centro de monitoreo GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).	49
Figura 28. Relación entre la deformación cortante máxima del depósito y la aceleración máxima en la base del depósito, PGA en la base del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).	50
Figura 29. Relación entre la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable y la aceleración máxima en la base del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).	52
Figura 30. Resultados de esfuerzo – deformación obtenidos a partir de ensayos triaxiales en arenas, donde Dr es la densidad relativa. Adaptado de Budhu (2015).	53
Figura 31. Relación entre la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).	54
Figura 32. Distribución de probabilidad para el piezómetro con el menor tiempo de ocurrencia de $ru = 0.5\%$ en el centro WLA.	55
Figura 33. Distribución de probabilidad para el piezómetro con el menor tiempo de ocurrencia de $ru = 0.5\%$ en el centro GVDA.	56
Figura 34. Diagrama de cajas de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable en el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable de los	

casos con $ru < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	58
Figura 35. Diagrama de cajas de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable en el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable de los casos con $ru < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	58
Figura 36. Diagrama de cajas de la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable hasta el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable de los casos con $ru < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	60
Figura 37. Diagrama de cajas de la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable hasta el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable de los casos con $ru < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	61
Figura 38. Relación de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este hasta el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este para los casos con $ru < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	62
Figura 39. Relación de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este hasta el instante de ocurrencia del $ru = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este para los casos con $ru < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).....	63

Capítulo 1.

Problema de Investigación

1.1. Introducción

La licuación es un fenómeno en el cual depósitos de suelos no cohesivos, poco consolidados y saturados, pierden parcial o totalmente su resistencia debido a la acción de cargas dinámicas como sismos. Durante su ocurrencia, el exceso de la presión de poros aumenta hasta el punto de igualar los esfuerzos efectivos, lo que ocasiona que el depósito de suelo se convierta en un fluido viscoso incapaz de resistir cualquier tipo de carga (Idriss, 2008; Kramer, 1996; Díaz, 2005). Santiago de Cali (Colombia), ubicada en una zona de amenaza sísmica alta y en la margen del río Cauca, no es ajeno a este fenómeno. Según la microzonificación sísmica de la ciudad, los depósitos correspondientes a la llanura aluvial del río Cauca cuentan con una capa superficial de arcilla (no licuable) seguida de una capa de arena potencialmente licuable, con espesor entre 0.75 y 10.0 m (Ingeominas, Dagma, 2005). Debido a esto, la licuación es considerada una de las principales amenazas naturales para la ciudad (Alcaldía de Santiago de Cali, 2016).

Estudios han demostrado que para este tipo de depósitos de suelo, con estratos potencialmente licuables no superficiales, la respuesta sísmica presenta ciertas particularidades, tales como: desplazamientos excesivos en superficie, aumento temporal del periodo predominante de vibración del suelo, amplificación en la respuesta en aceleración para periodos largos ($T > 1\text{ s}$) y atenuación para periodos cortos ($T < 1\text{ s}$) (Holzer, et al., 1989; Zeghal & Elgamal, 1994; Pease & O'Rourke, 1997; Holzer & Youd, 2007). Dichas particularidades se deben al ablandamiento que presenta el

estrato potencialmente licuable durante el evento sísmico, el cual es ocasionado por el aumento de la presión de poros (Youd & Carter, 2003; 2005).

Ejemplo de lo anterior se evidencia en la Figura 1, donde se presenta la respuesta registrada por el centro de investigación de *Wildlife Liquefaction Array* (WLA), durante el sismo de *Superstition Hills* (1987), California, EE. UU. Es de notarse que, a medida que el exceso de la presión de poros aumenta en el tiempo (Figura 1.a.), la rigidez, que corresponde a la pendiente equivalente de cada ciclo de histéresis (Figura 1.b.), disminuye considerablemente. Este ablandamiento del suelo se evidencia también en el aumento progresivo de la deformación cortante en el tiempo (Figura 1.a.). Asimismo, como puede observarse en Figura 1.a., la licuación se presenta a los 100 s del registro (cuando la razón de exceso de la presión de poros $r_u = 1$), sin embargo, las particularidades en la respuesta sísmica, debidas al ablandamiento del suelo, se presentan a partir de los 15 s, que es el tiempo cuando se dispara el exceso de la presión de poros.

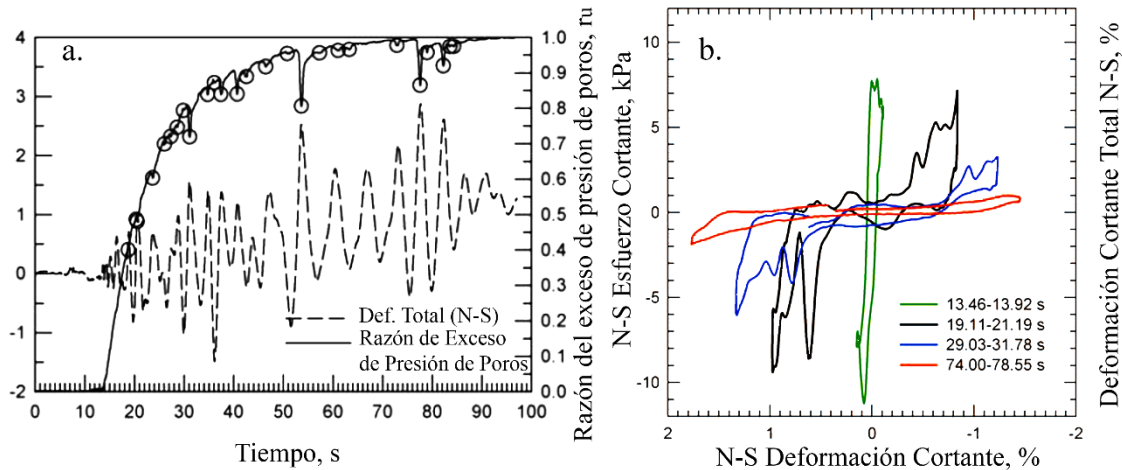


Figura 1. Respuesta sísmica del depósito de suelo de *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) durante el sismo de *Superstition Hills* (1987).

a. Curvas de deformación cortante promedio en la dirección N-S del estrato potencialmente licuable y razón del exceso de la presión de poros ($r_u = \Delta u / \sigma'$) en la parte superior del estrato potencialmente licuable.

b. Curvas de histéresis en distintos rangos de tiempo en la dirección N-S.

Adaptado de Holzer y Youd (2007).

Por estas particularidades, y como es mostrado en la Figura 2 para dos eventos que evidenciaron licuación, los modelos unidimensionales de respuesta sísmica convencionales, como el lineal, lineal equivalente (Schnabel, et al., 1972) y el no lineal (Hardin & Drnevich, 1972; Matasovic, 1993), no tienen la capacidad de estimar apropiadamente la respuesta sísmica en depósitos de suelos con estratos potencialmente licuables (Youd & Carter, 2005; Bouckovalas, et al., 2017). Debido a que con estos modelos (lineal equivalente y no lineal) fueron construidos los espectros de respuesta y, consecuentemente, el espectro de diseño para las zonas potencialmente licuables de Santiago de Cali (Ingeominas, Dagma, 2005), existe incertidumbre sobre la representatividad de estos espectros, los cuales son insumo fundamental en el diseño estructural.

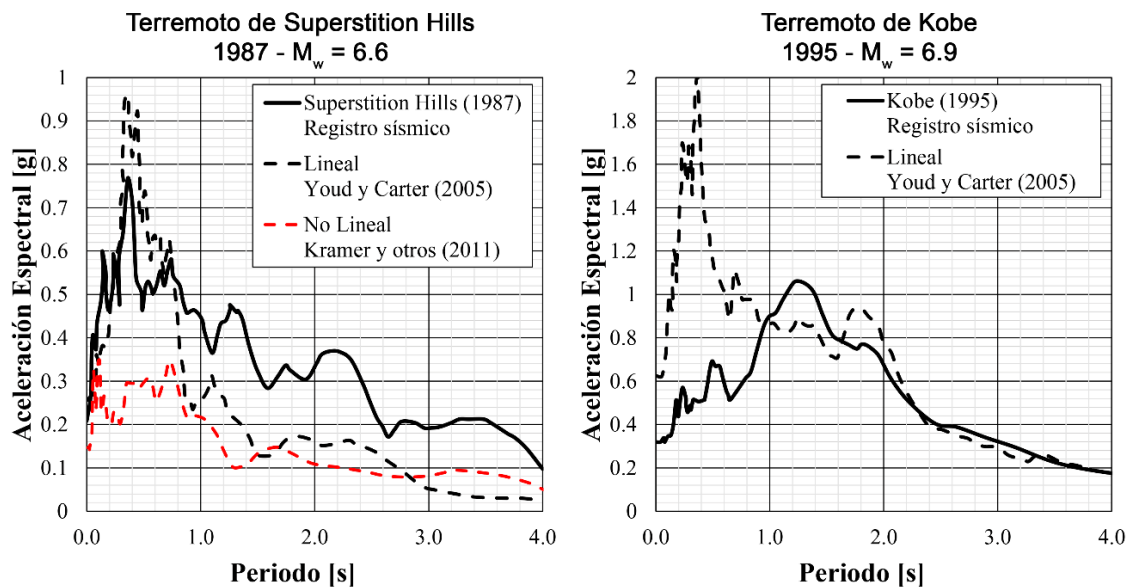


Figura 2. Espectros de respuesta obtenidos mediante registros sísmicos y modelos de respuesta sísmica unidimensionales. Adaptado de Youd y Carter (2005) y Kramer y otros (2011).

Por lo anterior, y con el objetivo de proponer un espectro de diseño acorde a las particularidades de los depósitos de suelo potencialmente licuables de Santiago de Cali, el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle, se encuentra investigando metodologías para estimar adecuadamente la respuesta sísmica en este tipo de depósitos de suelo mediante modelos de respuesta sísmica, y además, se encuentra implementando un centro de monitoreo de respuesta sísmica para la llanura aluvial del río Cauca.

1.2. Descripción del problema

Para llegar a una adecuada metodología para estimar espectros de respuesta e implementar el centro de monitoreo sísmico, tal como lo tiene proyectado el Grupo de Investigación G-7, es necesario realizar un arduo análisis de la respuesta sísmica en este tipo de depósitos de suelo mediante el estudio de registros sísmicos de sitios con estratos potencialmente licuables que se encuentren adecuadamente instrumentados, es decir, sitios donde la respuesta sísmica, la presión de poros y las deformaciones puedan ser monitoreadas durante la ocurrencia de un evento sísmico, con el fin de obtener datos de comparación con la respuesta estimada por las metodologías propuestas.

En la actualidad, se destacan dos centros de investigación de monitoreo sísmico ubicados al sur de California, EE.UU. que cumplen con los requisitos descritos anteriormente: *Wildlife Liquefaction Array* (WLA), que cuenta con más de 11,000 registros sísmicos, y *Garner Valley Downhole Array* (GVDA), con más de 9,000. Estos son operados por la Universidad de California en Santa Bárbara (UCSB) y forman parte del programa *Network of Earthquake Engineering Simulation* (NEES), auspiciado por *US National Science Foundation (NSF) George E. Brown, Jr* (UCSB; NEES, 2015).

Por lo anterior, en la presente propuesta de investigación se plantea ampliar el estado del arte de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales, mediante el estudio de registros sísmicos medidos a diferentes profundidades, en el dominio del tiempo, teniendo como caso de estudio los registros proporcionados por los centros de investigación de WLA y GVDA.

1.3. Formulación

Dada la necesidad de ampliar el entendimiento de la respuesta sísmica de este tipo de depósitos de suelo, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las particularidades en el tiempo de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales correspondientes a los centros de investigación de monitoreo sísmico de WLA y GVDA?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar las particularidades en la respuesta sísmica de los depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales correspondientes a los centros de investigación *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) y *Garner Valley Downhole Array* (GVDA), bajo diferentes niveles de excitación sísmica.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar los registros sísmicos de los centros de investigación WLA y GVDA, para diferentes niveles de excitación sísmica.
- Establecer las particularidades en la respuesta sísmica de los depósitos de suelo, con base en parámetros de intensidad en el dominio del tiempo para eventos con y sin evidencia de aumento del exceso de la presión de poros.
- Evaluar la incidencia de los parámetros de intensidad en el inicio del aumento del exceso de la presión de poros.

1.5. Justificación

El estudio de datos experimentales medidos en depósitos de suelos potencialmente licuables ha permitido comprender de mejor manera el fenómeno de la licuación y las repercusiones que este puede llegar a provocar en la respuesta sísmica superficial de este tipo de depósitos. Ejemplo de esto es el sismo de *Superstition Hills*, del 24 de noviembre de 1987 ($M_w = 6.6$) y el sismo de *Elmore Ranch*, del 23 de noviembre de 1987, los cuales permitieron entender que:

1. El ablandamiento del depósito de suelo se debe al aumento del exceso de la presión de poros (Zeghal & Elgamal, 1994; Holzer & Youd, 2007).
2. Se puede generar un aumento significativo del exceso de la presión de poros posterior a la finalización del evento sísmico (90% de la intensidad de Arias) (Youd & Steidl, 2004; Youd & Carter, 2005; Holzer & Youd, 2007).
3. El ablandamiento del suelo, debido al aumento del exceso de la presión de poros, aumenta temporalmente el periodo predominante de vibración en la superficie del suelo, llegando a causar una discrepancia entre la respuesta en superficie y la de profundidad (Youd & Steidl, 2004; Youd & Carter, 2005; Bouckovalas, et al., 2017).
4. La presencia de ondas superficiales de largos periodos, posteriores a la finalización del evento sísmico, pueden causar un movimiento oscilatorio considerable en la superficie (Holzer & Youd, 2007).

Por lo anterior, y dada la importancia en el aporte del estado del arte, entre el 2003 y 2004 el centro *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) fue re-instrumentado y trasladado a 65 m de la estación construida en 1982, en una zona adyacente a una ribera empinada del río Álamo, como parte del *NSF Network for Earthquake Engineering Simulation* (NEES) (UCSB; NEES, 2015). Asimismo, NEES opera, desde el 2004, el centro *Garner Valley Downhole Array* (GVDA), el cual fue instrumentado por primera vez en 1989 (UCSB; NEES, 2015; Yin, et al., 2016). En la actualidad, NEES publica los registros de estos centros de investigación en el portal web *NEES at UCSB Data Portal* (UCSB; NEES, 2015), el cual cuenta con más de 11,000 registros sísmicos del centro WLA, y con más de 9,000 del centro GVDA.

Debido al número de nuevos datos disponibles de estos centros de investigación, a la accesibilidad a estos, y dada la importancia de los estudios de los registros del centro WLA; en la presente propuesta de investigación se propone el estudio de registros sísmicos de los centros de investigación de WLA y GVDA, el cual permita ampliar el estado del arte de la respuesta sísmica de este tipo de depósitos de suelo, permitiendo, así, definir datos de respuesta reales, los cuales permitirán desarrollar metodologías de estimación de respuesta sísmica mucho más aproximadas con el comportamiento de depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales.

Capítulo 2.

Marco de Referencia

2.1. Antecedentes

En 1982, el equipo *US Geological Survey* (Bennet, et al., 1984) instrumentaron un depósito de suelo con estratos potencialmente licuables, en la llanura aluvial del río Álamo, estableciendo de esta manera la estación *Wildlife Liquefaction Array* (WLA). Esta se encuentra ubicada al sur del lago de Salton, en la reserva natural de “Vida Salvaje” (Wildlife) en el estado de California, EE. UU., en una zona de alta actividad sísmica. La instrumentación del WLA se componía por un acelerómetro superficial y otro en profundidad (downhole), a 7.5 m de la superficie, inmediatamente debajo del estrato potencialmente licuable de 4 m de espesor. Además de los acelerómetros, el centro de monitoreo contaba con seis piezómetros eléctricos: cinco de ellos ubicados en el estrato potencialmente licuable a diferentes profundidades, y el sexto a 12 m de profundidad.

El objetivo principal de este centro de monitoreo era la de registrar la respuesta del depósito de suelo durante la ocurrencia de licuación debida a las acciones dinámicas de eventos sísmicos de gran magnitud, el cual fue logrado durante el sismo de *Superstition Hills*, ocurrido el 24 de noviembre de 1987 ($M_w = 6.6$). Los registros tomados durante este sismo han dejado grandes enseñanzas en la respuesta sísmica de este tipo de depósitos de suelo, entre las cuales se encuentran:

1. El ablandamiento del depósito de suelo es debido al aumento del exceso de la presión de poros.
En el caso de WLA, a partir de que se produce un aumento en el exceso de la presión de poros, la

rigidez del suelo disminuye, condición que muestra la degradación del estrato potencialmente licuable (Zeghal & Elgamal, 1994; Holzer & Youd, 2007).

2. Se puede generar un aumento significativo del exceso de la presión de poros posterior a la finalización del evento sísmico (90% de la intensidad de Arias). En el caso del WLA, se presentaron grandes deformaciones cortantes después de la finalización del evento sísmico, las cuales causaron que la razón del exceso de la presión de poros aumentara del 40-50%, cuando el sismo alcanza el 90% de la intensidad de Arias, al 100% un minuto después. Este hecho se muestra en la Figura 3.a (Youd & Steidl, 2004; Youd & Carter, 2005; Holzer & Youd, 2007).
3. El ablandamiento del suelo, debido al aumento del exceso de la presión de poros, aumenta temporalmente el periodo predominante de vibración en la superficie del suelo. Para el caso de WLA, inmediatamente después del inicio del aumento del exceso de la presión de poros, el periodo predominante de la respuesta en superficie cambia de un rango de 0.2 a 0.5 s, antes del aumento de la razón del exceso de la presión de poros, a 2.7 s, cuando la razón del exceso de la presión de poros alcanza el 100%. Sin embargo, este efecto no se evidencia en la respuesta en profundidad, inmediatamente debajo del estrato potencialmente licuable a 7.5 m, como se muestra en la Figura 3.b., lo que demuestra que los sedimentos sobre el estrato potencialmente licuable sufren un desacople respecto a la estructura del suelo debajo de este (Youd & Steidl, 2004; Youd & Carter, 2005; Bouckovalas, et al., 2017).
4. La presencia de ondas superficiales de largos periodos, posteriores a la finalización del evento sísmico, pueden causar un movimiento oscilatorio de considerable amplitud en la superficie. Para el caso del WLA, la presencia de ondas Love de 5.5 s produjeron que la superficie del depósito de suelo presentara deformaciones cortantes de gran magnitud (Holzer & Youd, 2007).

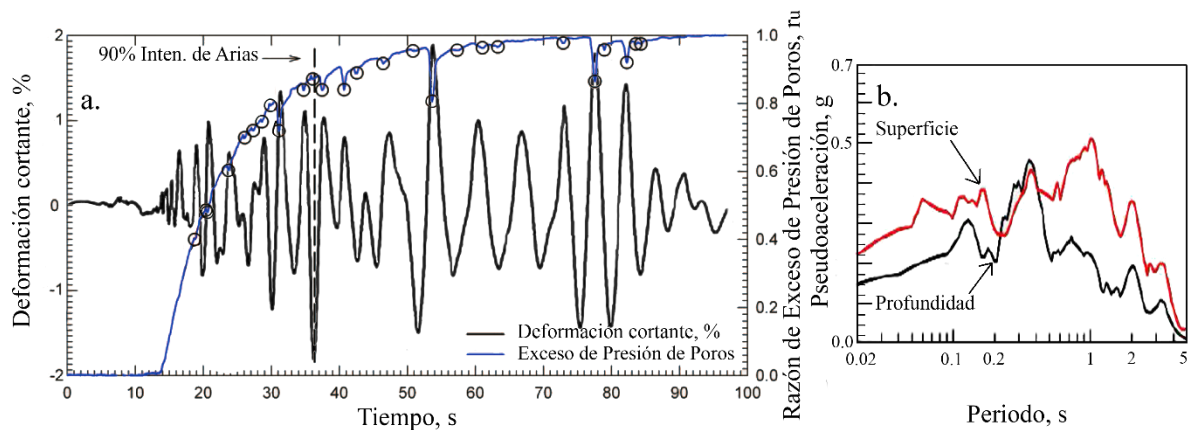


Figura 3. Respuesta sísmica del depósito de suelo de *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) durante el sismo de *Superstition Hills* (1987) con espectro de respuesta en pseudoaceleración. a. Deformación cortante promedio de los primeros 7.5 m de profundidad, y curva de la razón del exceso de la presión de poros a 2.9 m de profundidad, en el tope del estrato potencialmente licuable. b. Espectros de respuesta de pseudo-aceleración de la respuesta en superficie, y a 7.5m.

Adaptado de Holzer y Youd (2007), y Bouckovalas y otros (2017).

Además de estos estudios, Kramer y otros (2011) mostraron los cambios en la historia de la respuesta de las frecuencias predominantes del depósito de suelo de WLA durante el sismo de *Superstition Hills* (1987). El autor muestra, a través del espectrograma de Stockwell, que antes del inicio del aumento del exceso de la presión de poros a los 13-14 s, el cual es el instante del PGA en profundidad, el depósito de suelo presenta una frecuencia predominante de 3-6 Hz, valor que es aproximado a la frecuencia predominante estimada del depósito con base en los datos de la velocidad de onda S (V_s) Figura 4.

Sin embargo, después de este instante, las altas frecuencias predominantes de vibración del depósito disminuyen a unas muy bajas, presentándose sólo en algunos instantes un alto contenido de altas frecuencias, fenómeno que, según el autor, está asociado a la dilatancia, la cual es el fenómeno en el que suelos granulares sometidos a esfuerzos cortantes sufren un cambio en el volumen debido la superposición de las partículas (Wood, 1990). De esta manera, el autor asegura la importancia de determinar el tiempo en el cual inicia el aumento del exceso de la presión de poros, ya que este parámetro influye en los verdaderos efectos de la licuación en la respuesta sísmica.

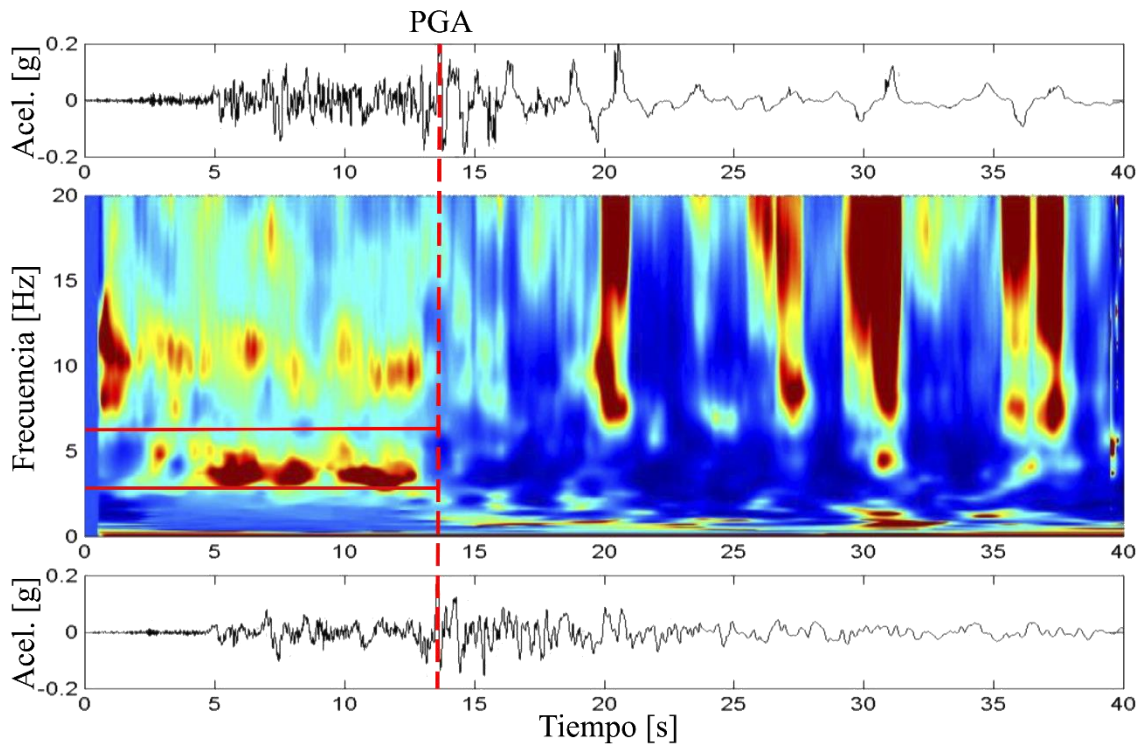


Figura 4. Gráficos de los registros en aceleración en superficie (superior) y profundidad (inferior) en las componentes NS; y de la razón espectral de Stockwell tiempo-frecuencia.

El color más rojo oscuro representa los valores más altos de la razón espectral.

Adaptado de Kramer y otros (2011).

2.2. Estado del Arte

2.2.1. Centros de investigación de monitoreo y registro sísmico en depósitos de suelo potencialmente licuables

Los centros de investigación de monitoreo sísmico proveen información esencial para el entendimiento de la respuesta sísmica y las deformaciones del suelo. Por esto, alrededor del mundo se han creado múltiples proyectos de investigación que integran la instalación de estaciones de monitoreo y registro sísmico a diferentes profundidades, con el fin de ampliar el entendimiento en la respuesta sísmica de diferentes tipos de depósitos de suelo. Entre estas estaciones se destacan *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) y *Garner Valley Downhole Array* (GVDA).

2.2.1.1. Wildlife Liquefaction Array - WLA

En 1987, el centro de monitoreo WLA registró dos eventos sísmicos de una magnitud importante: el sismo *Elmore Ranch*, del 23 de noviembre ($M_W = 6.2$; $a_{max} = 0.16g$) el cual generó un aumento considerable en la presión de poros; y el sismo de *Superstition Hills*, del 24 de noviembre ($M_W = 6.6$; $a_{max} = 0.21g$) el cual generó licuación en una gran extensión del sitio (Youd & Steidl, 2004). Sin embargo, un tiempo después de la ocurrencia de estos eventos sísmicos, algunos piezómetros dejaron de funcionar, y las investigaciones invasivas realizadas en el sitio posteriores a la ocurrencia de los sismos de 1987, alteraron en gran medida las condiciones del sitio. No obstante, a través de NEES, entre el 2003 y 2004, WLA fue trasladado y re-instrumentado a 65 m de la antigua estación (Youd & Steidl, 2004; UCSB; NEES, 2015).

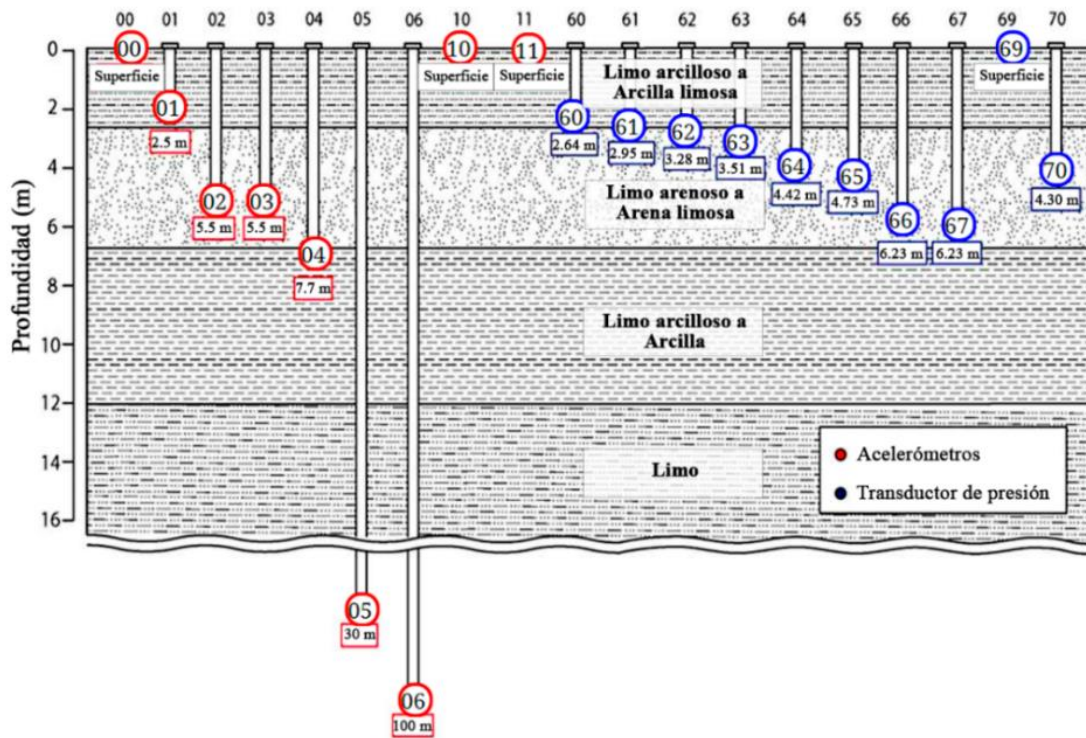


Figura 5. Instrumentación en *Wildlife Liquefaction Array* (WLA).

Adaptado de NEES@UCSB (2015).

La geología superficial del sitio donde se ubica la nueva instrumentación de WLA, Figura 5, consiste en un estrato limo arcilloso a arcilla limosa, de entre 2.5 a 3.0 m de espesor, seguido de un estrato

granular de 3.5 a 4.0 m de espesor, compuesto de limos, arenas limosas, y limos arenosos. A una mayor profundidad, se encuentra un estrato compuesto principalmente de arcillas limosas a arcillas. La instrumentación del WLA comprende 6 acelerómetros en profundidad (*downhole*), a 2.5, 5.5, 5.5, 7.7, 30 y 100 m; 3 superficiales, 8 piezómetros, 5 indicadores de inclinación, 3 tuberías flexibles y una red de marcadores superficiales. Los últimos tres instrumentos son necesarios para la medición de la deformación del suelo. En este estudio el acelerómetro ubicado a 100 m es el considerado como la base del depósito del centro WLA, debido a que es el acelerómetro disponible con mayor profundidad.

2.2.1.2. *Garner Valley Downhole Array - GVDA*

GVDA se encuentra ubicado al sur de California, EE. UU., en un valle estrecho entre el *Peninsular Ranges Batholith*, 20 km al suroeste de *Palm Springs*, el cual es conocido por presentar una alta actividad sísmica, debido a la cercanía de las fallas de San Jacinto y San Andrés. Esta estación opera desde 1989, convirtiéndose en un sitio de investigación geotécnica activa, enfocado a la respuesta dinámica superficial y subsuperficial del suelo. Actualmente, este sistema de monitoreo hace parte del NSF *Network of Earthquake Engineering Simulation* (NEES), a partir del año 2004, llegando a registrar más de 9,000 eventos sísmicos, en un rango amplio de magnitudes (Yin, et al., 2016; UCSB; NEES, 2015).

La estratigrafía superficial de los depósitos de suelo de GVDA consiste en un aluvión entre los primeros 18 y 25 m (Figura 6). La distribución geológica del aluvión consiste en arenas limosas, arenas, arenas arcillosas y gravas limosas. A una mayor profundidad, entre los 18 y 25 m de profundidad, el aluvión gradualmente pasa a granitos descompuestos, los cuales, posteriormente, pasan a una arena gravosa hasta alcanzar el lecho rocoso, el cual se encuentra a los 88 m de profundidad (UCSB; NEES, 2015). La instrumentación del GVDA consiste en 5 acelerómetros superficiales, con una separación entre ellos de 61 m, 6 sensores de profundidad, a 6, 15, 22 50 200 y 500 m; y 13 transductores de presión instalados a 0, 0, 3.5, 4.3, 6.2, 8.8, 10.1, 12.4, 333, 339, 417, 428 y 494 m de profundidad.

En este estudio el acelerómetro ubicado a 150 m es el considerado como la base del depósito del centro GVDA, ya que es el segundo sensor de mayor profundidad.

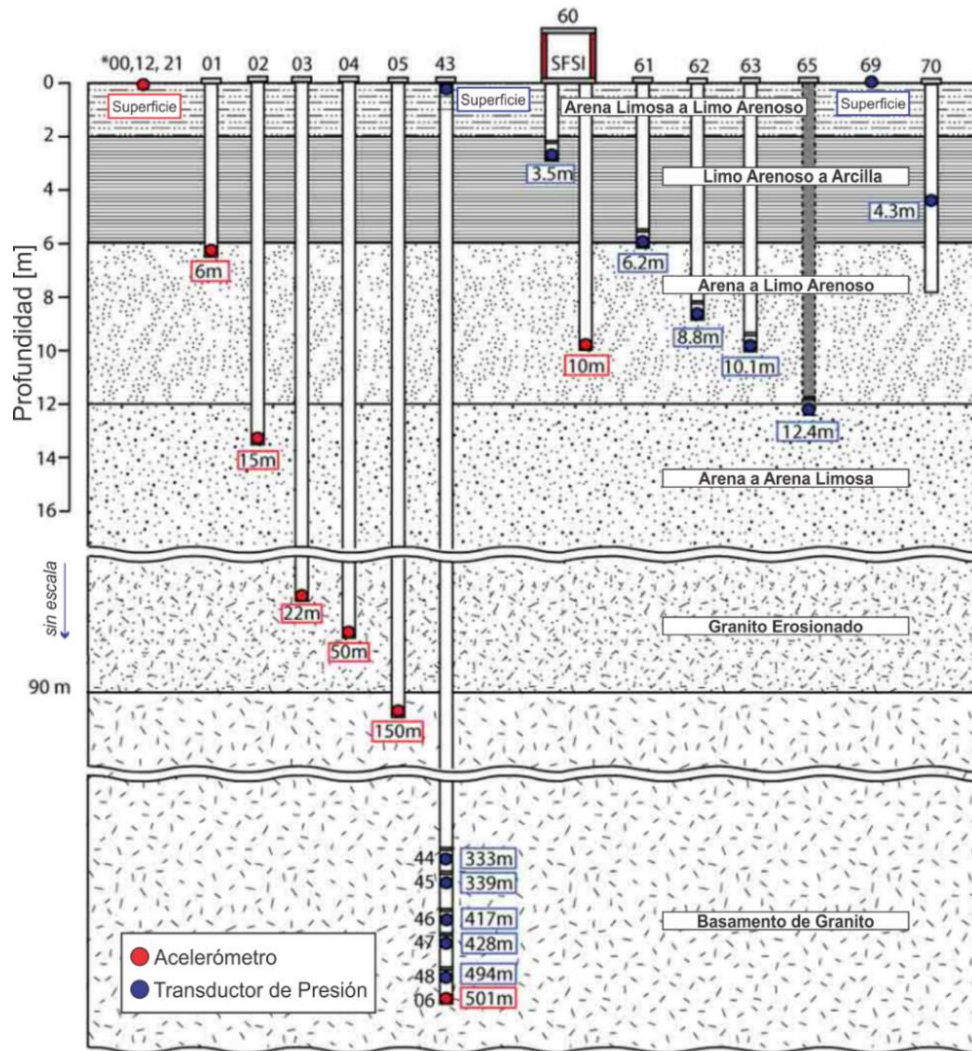


Figura 6. Instrumentación en *Garner Valley Donwhole Array*.
Adaptado de NEES@UCSB (2015).

2.2.2. NEES at UCSB Data Portal - NEES@UCSB

El portal web *NEES at UCSB Data Portal* – NEES@UCSB (Figura 7), fue creado con el propósito que la comunidad investigativa tuviera un fácil acceso a los datos de los centros de monitoreo a cargo

del NEES (UCSB; NEES, 2015). En la actualidad, el portal NEES@UCSB integra los datos de varios centros de monitoreo, entre los cuales se destacan el WLA y el GVDA. Esto se debe a la gran cantidad de datos que son registrados por mes, relacionados a 100 eventos sísmicos aproximadamente, entre los cuales se han llegado a registrar eventos con un PGA en superficie del orden de 10%g. A pesar de que la mayoría de estos registros son de baja magnitud, estos proveen una información de control del comportamiento lineal del sitio (Steidl, et al., 2008).

En el portal NEES@UCSB, con base en un criterio de magnitud, distancia del sitio, rango de fechas e incluso la aceleración pico en superficie, los eventos y los datos disponibles de los canales pueden ser buscados. Los canales seleccionados para un determinado evento pueden ser luego procesados a uno o más formatos de descarga, con información adicional (metadatos) de cada canal/sensor.

El portal web tiene cuatro ventanas principales (Figura 7):

- Bloque de ingreso de criterio de búsqueda.
- Página de la lista de los eventos resultados de la búsqueda.
- Mapa de Google del área de búsqueda y de los eventos buscados.
- Lista de los datos disponibles de los canales.

Cuando los eventos han sido seleccionados, y los datos de los canales deseados han sido llevado al “carro” de descarga, se pueden seleccionar el o los formatos de descarga, entre los cuales se encuentra el formato Matlab-CSV (un evento sísmico por archivo, con formato ASCII separado por comas). Para este trabajo se usaron los datos disponibles de este portal web.

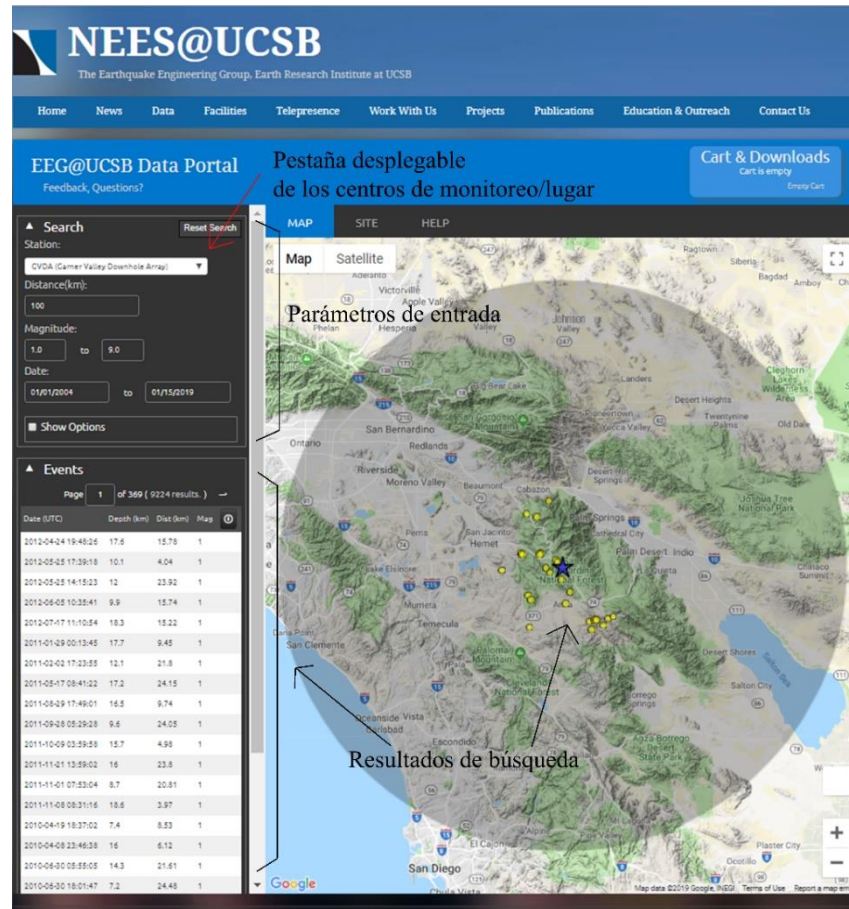


Figura 7. Interfaz del portal web de NEES@UCSB.
Adaptado de NEES@UCSB (2015).

2.2.3. Parámetros de evaluación en el dominio del tiempo

Las características y propiedades de los sismos son de gran variedad y complejidad, llegando a tener especial interés unos más que otros dentro del campo de la ingeniería civil. A continuación, se mencionan los parámetros de intensidad que se tendrán en consideración para el análisis en el dominio del tiempo de los registros sísmicos.

2.2.3.1. Intensidad de Arias – IA

La Intensidad de Arias (Arias, 1970) es una medida de la energía del terremoto, y se define según la siguiente integral:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_o}^{t_f} a^2(\tau) d\tau$$

Ecuación 1

siendo $a(t)$ la historia de la respuesta de aceleración, y t_f el tiempo total del registro.

A partir de este parámetro, se puede definir la duración significativa del sismo (Trifunac & Brady, 1975), el cual relaciona la duración con la fase de máxima energía del movimiento. La duración significativa se define como el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias.

2.2.3.2. PGA, PGV y PGD

La aceleración pico del suelo (PGA) es la máxima respuesta en aceleración de un depósito de suelo ante un evento sísmico, es decir, es igual a la máxima amplitud absoluta del registro de aceleración relacionado a un sismo en particular. Debido a que los movimientos sísmicos se dividen en tres componentes, el PGA se presenta en las componentes horizontales y vertical; no obstante, el PGA en la componente horizontal es el más aplicado.

Otro parámetro de medición del nivel de excitación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo es la velocidad pico del suelo (PGV) y el desplazamiento pico del suelo (PGD). El PGV se obtiene al integrar el registro de aceleración y determinar la máxima amplitud absoluta de la respuesta en velocidad. Por otra parte, el PGD se obtiene al realizar una doble integración en el tiempo del registro de aceleración, y determinar, posteriormente, la máxima amplitud absoluta, la cual corresponde al máximo desplazamiento.

Una de las aplicaciones más importantes del PGA, PGV y PGD es la estimación de los espectros de respuesta elásticos para el diseño estructural. Otras aplicaciones incluyen las razones PGA/PGV, para el cálculo del contenido de las frecuencias de la respuesta del suelo; PGV/PGA y PGD/PGV para estimar los periodos correspondientes a los bordes de la meseta correspondiente a la aceleración constante, y también para determinar el inicio de la meseta de desplazamiento (Akkar & Bommer, 2007).

Capítulo 3.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se dividió la metodología en tres objetivos, los cuales se muestran en la Figura 8 y se describen en el presente capítulo.

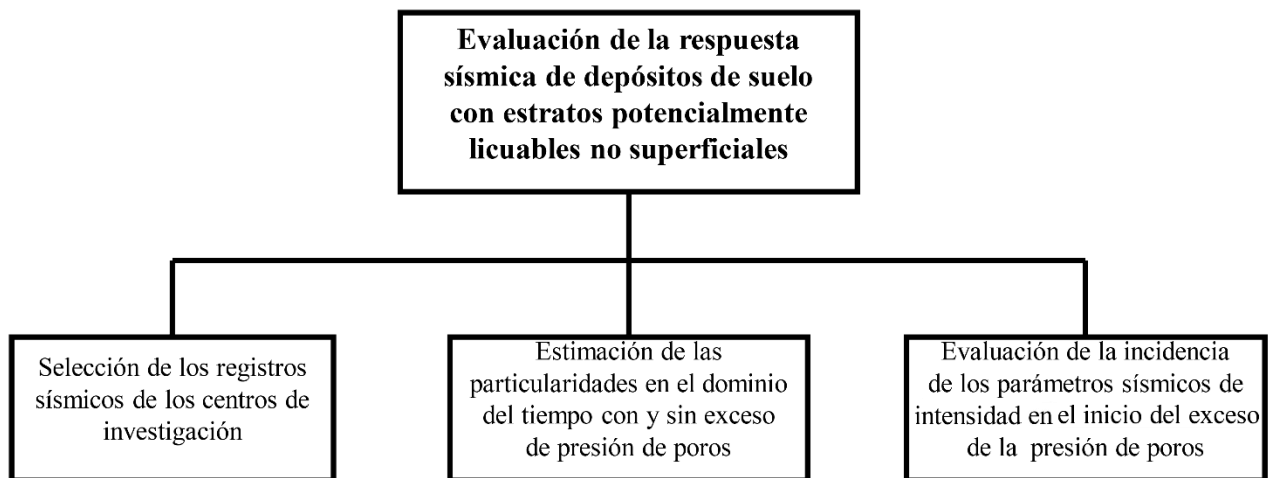


Figura 8. Objetivos metodológicos.

3.1. Selección de los registros sísmicos de los centros de monitoreo

Desde su incorporación al programa NEES, los centros de monitoreo WLA y GVDA han registrado un gran número de eventos sísmicos en un rango amplio de intensidades, lo que causa que el análisis

de cada evento, considerando los registros de aceleración y de presión, se convierta en una tarea compleja. De esta manera, para el desarrollo de esta investigación, fue necesario definir el tamaño de muestra de los eventos a partir de un análisis previo de los datos disponibles. Este consistió, en primer lugar, en la clasificación de los eventos según el nivel de la presión de poros, con y sin exceso de la presión de poros. Posteriormente, para los eventos sin exceso de la presión de poros se calculó un tamaño de muestra representativo según la magnitud sísmica. En la Figura 9 se muestra el flujo de trabajo del primer objetivo metodológico.

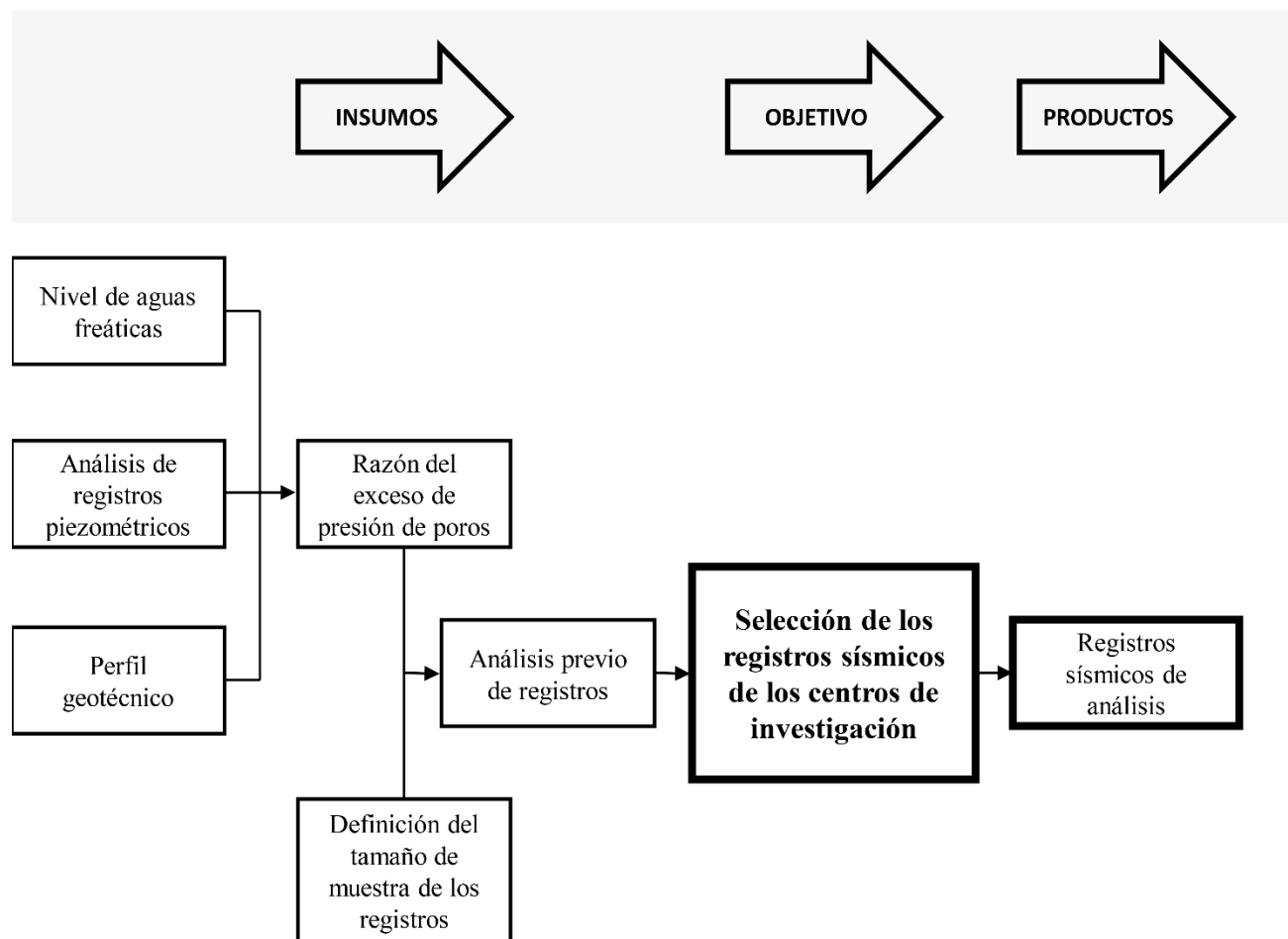


Figura 9. Flujo de trabajo del primer objetivo metodológico.

3.1.1. Razón del exceso de la presión de poros

3.1.1.1. Perfil de variación del nivel de aguas freáticas W_T

Para el cálculo del nivel de aguas freáticas, los centros de monitoreo cuentan con *transductores analógicos de presión* (presiones totales), ubicados a un poco más de 4.2 m de profundidad, y barómetros en superficie, que permiten calcular en todo instante el nivel de aguas freáticas (The Institute for Crustal Studies, UCSB, 2007; 2008).

De esta manera, a partir del cálculo de los datos manométricos, los pasos para la obtención de la curva de variación del nivel de aguas freáticas fueron los siguientes:

1. Se seleccionaron entre 3 y 4 registros por mes durante el periodo de análisis, asociados a eventos con M_L entre 2.0 y 3.5.
2. Se remuestrearon los datos obtenidos a partir de la *interpolación con polinomio de Hermite*, el cual fue aplicado con la función *interp1* de Matlab®.
3. Se suavizaron los datos obtenidos con el filtro *Savitzky Golay*, cuyos parámetros de variación se seleccionaron mediante una optimización con algoritmos genéticos.

3.1.1.2. Análisis de registros piezométricos

Para el análisis del exceso de presión, se seleccionaron solo los piezómetros distribuidos en el estrato potencialmente licuable entre los transductores de presión disponibles en los centros de monitoreo, tal como se relaciona en la Tabla 1 y la Tabla 2 para WLA y GVDA, respectivamente. A partir de los datos de presión, se descartaron aquellos cuyos registros de presión presentaran inconsistencias, o se consideraran atípicos. Esto con el fin de evitar el cálculo de razones de exceso de la presión de poros no representativos.

Tabla 1. Selección de piezómetros para análisis de r_u en el centro WLA.

Piezómetro	Profundidad (m)	Piezómetro	Profundidad (m)
SB WLA HDD 60	2.5	SB WLA HDD 64	4.3
SB WLA HDD 61	2.8	SB WLA HDD 65	4.6
SB WLA HDD 62	2.8	SB WLA HDD 66	6
SB WLA HDD 63	3.4	SB WLA HDD 67	6.1

Tabla 2. Selección de piezómetros para análisis de r_u en el centro GVDA.

Piezómetro	Profundidad (m)
SB GVDA HDD 61	6.2
SB GVDA HDD 62	8.8
SB GVDA HDD 63	10.1
SB GVDA HDD 65	12.4

3.1.1.3. Perfil geotécnico: Esfuerzos totales σ

El esfuerzo total en un punto de un perfil de suelo, considerando múltiples estratos, se calculó a partir de la Ecuación 2, donde H_j es el espesor del estrato con peso unitario γ_j .

$$\sigma = \sum_{j=1}^n H_j \gamma_j \quad \text{Ecuación 2}$$

No obstante, el peso unitario del suelo varía, a su vez, según el nivel de humedad: en condición saturada γ_{sat} , húmedo o en condición natural γ , y seco γ_d . Para los casos de estudio, los datos geotécnicos del perfil stratigráfico y los pesos unitarios correspondientes de los centros de monitoreo se encuentran disponibles en el portal web *NEES at UCSB Data Portal* – NEES@UCSB, (2015); los cuales se describen a continuación.

Para el centro de monitoreo WLA, el depósito de suelo está compuesto predominantemente por arcillas, limos y arenas, donde los datos de los pesos unitarios de las arcillas y limos en condición natural y saturada se pueden determinar a partir de los datos de los ensayos de consolidación realizados para el sondeo D2. De los datos disponibles, el peso unitario natural γ está disponible a para las diferentes muestras; mientras que el peso unitario saturado γ_{sat} se determinó a partir de la gravedad específica G_s , y el peso seco γ_d disponibles del ensayo.

No obstante, debido a que no se tomaron muestras inalteradas para los estratos de arenas, se asumió un γ de 17.5 kPa, mientras que el γ_{sat} se calculó con base en γ y una gravedad específica de 2.65, de acuerdo a los valores de referencia presentados por Budhu (2010).

Para el centro de monitoreo GVDA, debido a que no fueron extraídas muestras inalteradas, no se tienen datos de los pesos específicos para ningún estrato. Es por esto que, se tomaron los datos disponibles del ensayo CPT con código RVC001, y se procesaron con el software *CLiq v.2.3* y *CPeT-IT v.2.0* (GeoLogismiki, et al., 2018a; 2018b), el cual permite estimar el peso unitario en función de la profundidad y obtener un perfil de esfuerzos totales y efectivos.

3.1.1.4. Cálculo de la razón del exceso de la presión de poros r_u

La razón del exceso de la presión de poros se determinó según la Ecuación 3, donde Δu es el exceso de la presión de poros y σ'_o es el esfuerzo efectivo vertical inicial en el punto de medición de la presión de poros (Idriss, 2008).

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_o} \quad \text{Ecuación 3}$$

El exceso de la presión de poros máximo se determinó a partir de la diferencia máxima entre las lecturas de presión y la presión de poros inicial u_o , donde este último se calculó como el promedio de los valores iniciales hasta el instante previo al “disparo” o incremento repentino de la presión de poros. En la Figura 10 y la Figura 11 se muestra el cálculo de los valores máximos del exceso de la presión de poros para dos registros de los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente.

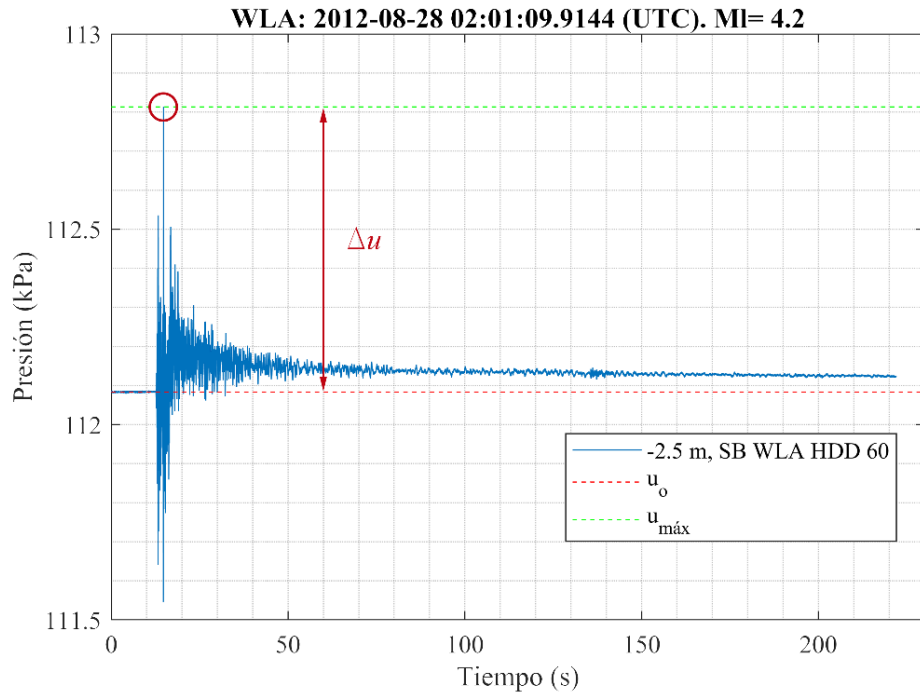


Figura 10. Metodología de obtención del exceso de la presión de poros máximo para un registro en WLA.

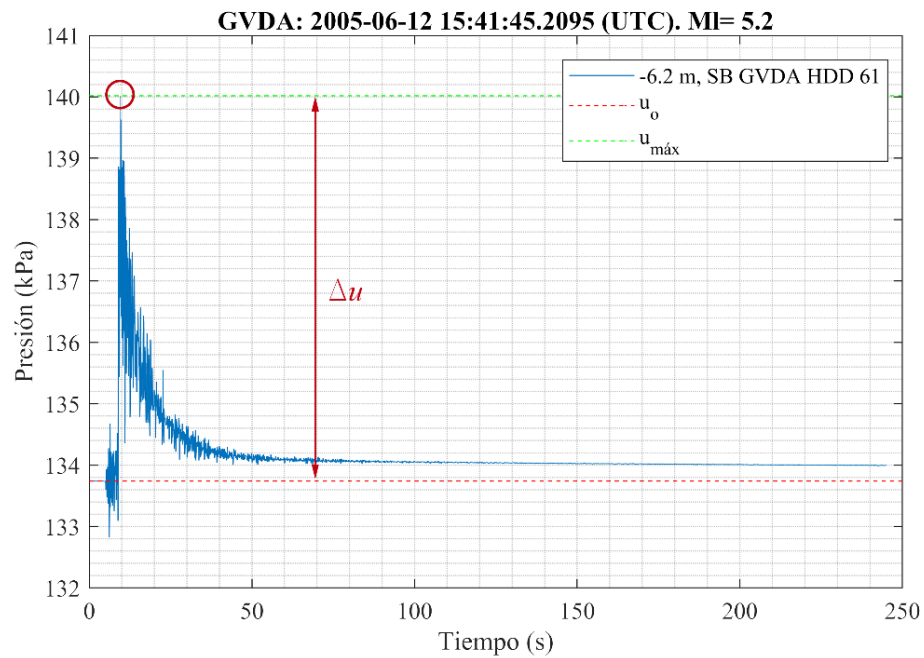


Figura 11. Metodología de obtención del exceso de la presión de poros máximo para un registro en GVDA.

Posterior al cálculo de Δu , para cada registro piezométrico, y a partir de la estimación del esfuerzo efectivo σ'_o para las profundidades de cada piezómetro en el instante de ocurrencia del evento, se determina la curva de la razón del exceso de la presión de poros, donde el máximo valor alcanzado entre todos los registros piezométricos es el valor de $(r_u)_{m\acute{a}x}$ asignado al evento sísmico. En la Figura 12 y la Figura 13 se muestran los valores de r_u para dos eventos sísmicos de los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente.

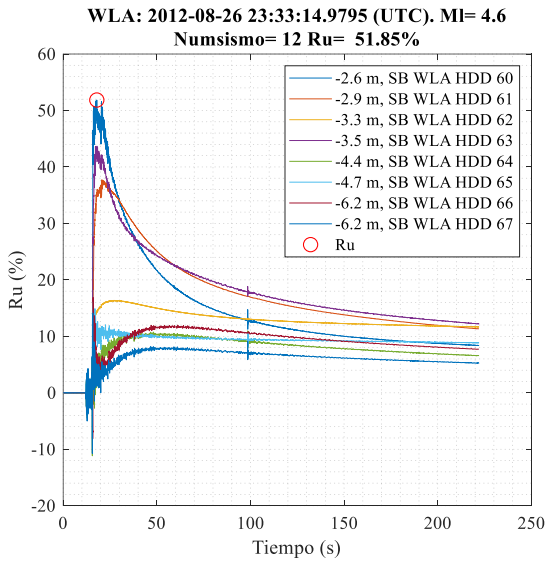


Figura 12. r_u calculado según los datos piezométricos en un evento en WLA.

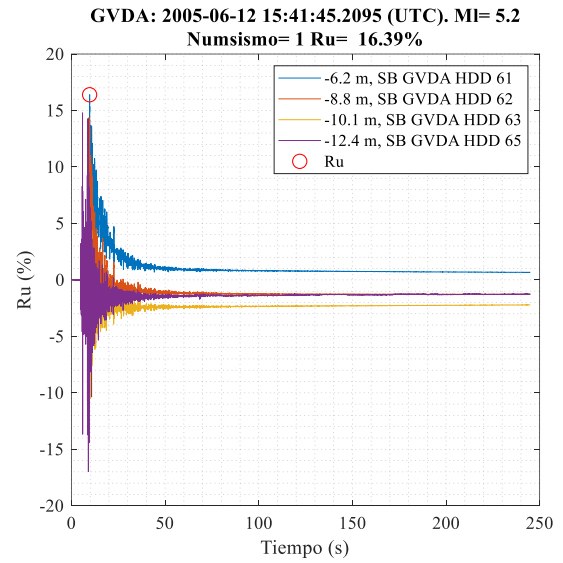


Figura 13. r_u calculado según los datos piezométricos en un evento en GVDA.

3.1.2. Tamaño de la muestra

El número total de registros sísmicos disponibles en el portal NEES@UCSB a la fecha de la descarga de los datos, 24 de enero de 2019, fue 11.325 para WLA, y 9.330 para GVDA. Debido al gran número de eventos, se descartaron los sismos con M_L menor a 3 para definir un tamaño de muestra menor. Como el objetivo principal de la investigación fue determinar las particularidades del comportamiento sísmico con y sin exceso de la presión de poros para los depósitos de suelo en análisis, se resolvió definir el tamaño de la muestra de acuerdo con esta misma condición.

Por lo anterior, la selección de los eventos en los que se presentó un aumento considerable en la presión de poros se determinó de la siguiente forma:

1. Se calcularon las razones del exceso de la presión de poros para todos los sismos con magnitudes M_L mayores a 4.0, ya que en una investigación realizada por El-Sekelly y otros, (2017), se evidenció que los eventos que presentan exceso de presión de poros para un depósito de suelo, tienen magnitudes mayores a este valor.
2. A partir del $(r_u)_{máx}$ de cada evento, se seleccionaron los sismos con *presión de poros considerable*, la cual se define como los eventos que presentaron un $(r_u)_{máx} \geq 2\%$, de acuerdo con El-Sekelly y otros, (2017).

Del análisis de WLA, se pudo comprobar que, de todos los registros que presentaron un $(r_u)_{máx} \geq 2\%$, 13 coincidieron con los registros con exceso de la presión de poros significativo según la información reportada por El-Sekelly y otros, (2017). De esta manera, se seleccionaron todos los eventos con exceso de la presión de poros determinados a partir del análisis anterior para definir la muestra de eventos con exceso de la presión de poros considerable.

Por otra parte, para el tamaño de las muestras de los registros sísmicos que no presentaron *presión de poros considerable*, se implementó la técnica del *muestreo aleatorio estratificado*, ya que existe un número de ocurrencia mucho mayor para eventos sísmicos con magnitudes bajas. De esta manera, se determinaron las muestras representativas de los eventos agrupados según los intervalos de magnitudes 3-4, 4-5 y mayores a 5, con base en la Ecuación 4, donde N es el tamaño de la población, Z_α es el nivel de confianza obtenido de la tabla de distribución normal estándar, p es la proporción de individuos que poseen las características de estudio, q es la proporción de individuos que carecen de las características de estudio, e es la precisión (error muestral deseado), y n es el tamaño de la muestra.

$$n = \frac{N Z_\alpha^2 p q}{e^2(N - 1) + Z_\alpha^2 p q} \quad \text{Ecuación 4}$$

Ya que para determinar el tamaño de la muestra no se tiene información previa para realizar el análisis estadístico, para este estudio se asumieron los parámetros e igual al 10%, Z_α igual a 1.65, valor que

corresponde a un nivel de confianza del 90% en una distribución normal; y el parámetro p , porcentaje de eventos que no presentaban anomalías, igual al 85% para GVDA, mientras que para WLA como el 80%, ya que para GVDA se encontraron varios eventos con problemas en los registros de aceleración, por lo que era necesario tener un mayor número de eventos de análisis.

3.1.3. Análisis previo de registros

Para el análisis previo de los datos de cada uno de los eventos sísmicos, se definió una rutina que consistió en la revisión sistemática de los registros de aceleración en cada una de sus componentes horizontales, y también de los datos piezométricos, con el fin de descartar los registros que se consideraran atípicos o no consistentes. Este último criterio se basó en que cada registro, para el caso de las aceleraciones, no presentara un nivel de ruido considerable, principalmente en el rango de frecuencia de análisis definido en el tratamiento de las señales; mientras que, para el caso de los registros piezométricos, que estos no presentaran ruido excesivo. Asimismo, se descartaba el evento sísmico si se descartaba alguno de los registros de aceleración correspondientes a los sensores ubicados en la superficie, en la base del depósito definida para cada centro de monitoreo, o en la base del estrato potencialmente licuable; o se descartaba el registro piezométrico ubicado en la parte superior del estrato potencialmente licuable.

Así, el listado de los eventos sísmicos de análisis de los centros WLA y GVDA que se usaron para el desarrollo de la investigación, se muestra en los anexos, los cuales se dispusieron de forma cronológica. De estos eventos resultaron más de 1.800 registros de aceleración, y más de 1.100 registros piezométricos.

3.2. Estimación de las particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros

A partir de los registros sísmicos de análisis para cada centro de monitoreo, y con el fin de determinar las particularidades de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo, se definieron relaciones entre varios parámetros sísmicos de intensidad, incluyendo la magnitud sísmica. En la Figura 14 se muestra el flujo de trabajo para el desarrollo del segundo objetivo metodológico.

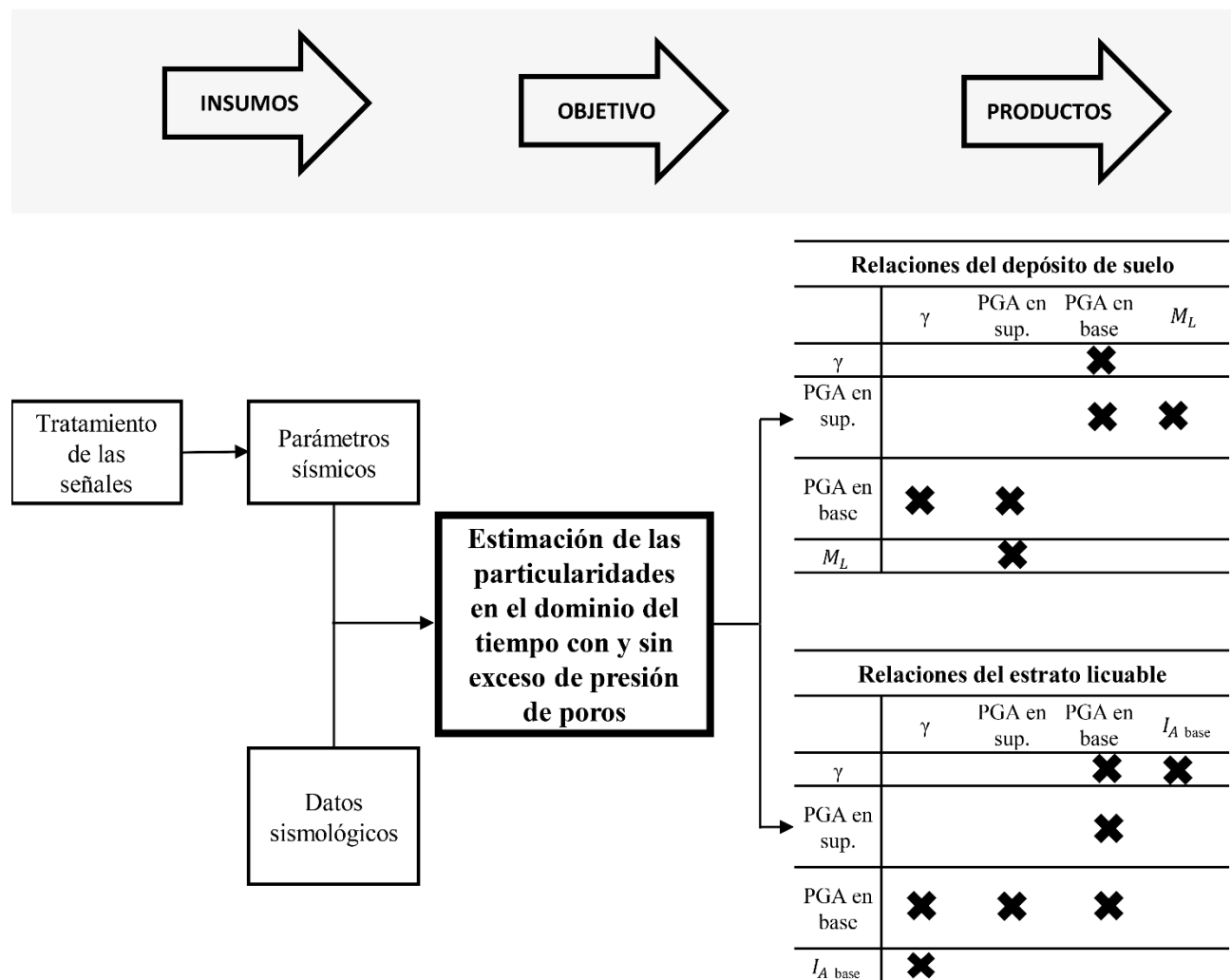


Figura 14. Flujo de trabajo del segundo objetivo metodológico.

3.2.1. Parámetros sísmicos de intensidad

3.2.1.1. Tratamiento de señales

Para definir la rutina de procesamiento de los registros sísmicos de este estudio, se siguió la corrección de línea base, *baseline correction*, incorporado en el software *Deepsoil*® v.7.0 (Hashash, et al., 2018), la cual está basada en la rutina de procesamiento de acelerogramas de movimiento fuerte, *Basic Strong-Motion Accelerogram Processing* (BAP), de *United States Geological Survey* (USGS) (Converse & Brady, 1992); y consiste en la aplicación de los siguientes pasos:

1. Truncar los extremos de la señal usando el primer y el último cruce de ceros como límites.
2. Incorporar en cada extremo de la señal truncada un vector de ceros.
3. Procesar la señal en el dominio del tiempo con un filtro *Butterworth high-pass* de segundo orden (con frecuencia de corte de 0.1 Hz), con convolución en ambas direcciones.
4. Truncar la señal nueva usando el último corte de ceros como límite.

Para definir la longitud del vector de ceros, el USGS recomienda que sea como mínimo igual a un tiempo T_{zpad} , en segundos, el cual está en función de la frecuencia de corte F_c del filtro *high-pass* y el orden n del mismo, según la Ecuación 5, y la cual debe distribuirse equitativamente a ambos extremos de la señal (Converse & Brady, 1992).

$$T_{zpad} = 1.5n/F_c$$

Ecuación 5

El filtro *high-pass* permite atenuar el ruido correspondiente a bajas frecuencias, las cuales pueden ser causadas por la digitalización, desviación instrumental, e inclinación del acelerómetro: esto es importante al momento de obtener los desplazamientos a través de la doble integración de los datos en aceleración, ya que de no realizarse, la integración numérica puede llegar a calcular desplazamientos muy grandes y poco realistas.

Tabla 3. Registros sísmicos utilizados para validación de rutina de procesamiento.

Registro	Evento sísmico				Canal del Sensor	
	Fecha (UTC)	Hora	ML	Profundidad [km]	Canal	Profundidad [m]
1	31 de agosto de 2005	9:48:52 p. m.	3.1	4.5	NP_5210_HNN_02	7.7
2	6 de abril de 2010	7:01:10 a. m.	3	10	SB_WLA_HNN_00	0.0
3	7 de abril de 2010	7:33:54 a. m.	3.3	1.1	SB_WLA_HNN_02	5.5
4	5 de octubre de 2011	7:36:24 a. m.	3.1	14.7	NP_5210_HNN_00	0.0
5	23 de mayo de 2013	6:54:09 p. m.	3	1	SB_WLA_HNN_04	7.7
6	28 de mayo de 2015	12:13:47 p. m.	3.4	10.4	SB_WLA_HNN_05	30.0
7	29 de abril de 2017	5:07:02 p. m.	3.6	9.4	SB_WLA_HNN_01	2.5

La codificación de la rutina *baseline correction* del Deepsoil® v. 7.0 se reprodujo en el entorno de Matlab®, la cual fue validada utilizando los resultados obtenidos del mismo software para siete registros sísmicos correspondientes al centro de monitoreo WLA, los cuales se listan en la Tabla 3, empleando para ello el cálculo del nivel de ajuste descrito en la Ecuación 6. Además de la comparación de la aplicación de la rutina a los datos en aceleración, se realizó la comparación de los datos obtenidos del Deepsoil® de velocidad y desplazamiento, obtenidos a través de integración numérica, cuyos resultados promedios de ajuste se muestran en la Tabla 4.

$$FIT = 1 - \frac{\|Data_{Deepsoil} - Data_{cod}\|}{\|Data_{Deepsoil} - mean(Data_{Deepsoil})\|} \quad \text{Ecuación 6}$$

Tabla 4. Promedio de ajuste y desviación estándar.

	Ajuste prom. (%)	Desv. estándar (%)
Aceleración	99.999	0.0002
Velocidad	99.984	0.0015
Desplazamiento	99.983	0.0012

De los resultados, se puede notar que los obtenidos mediante la codificación de la rutina presentan un ajuste de casi el 100%, lo que permite afirmar que la codificación es igual a la incorporada en Deepsoil® v. 7.0. Un ejemplo de los resultados se muestran en la Figura 15 y la Figura 16, las cuales corresponden a las gráficas de aceleración y desplazamiento del registro 7 de la Tabla 3, asociado al

evento sísmico del 29 de abril del 2017 con M_L de 3.6, aplicando la rutina del Deepsoil® y la codificada.

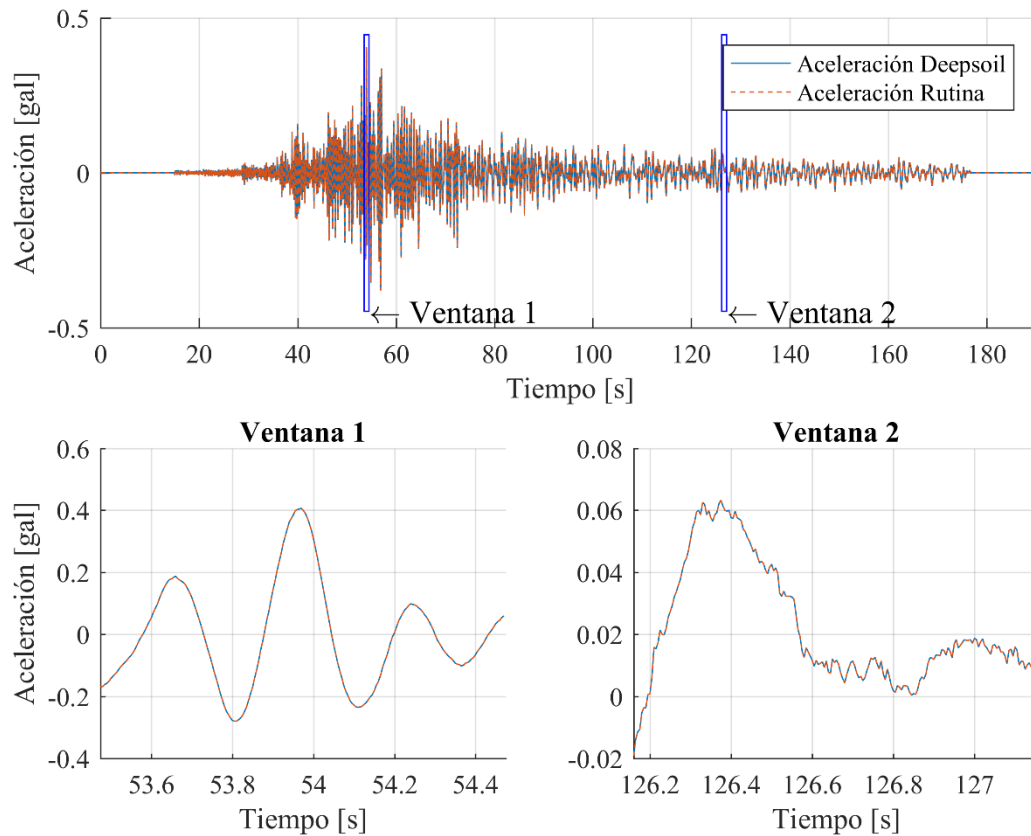


Figura 15. Comparación de la aplicación de la rutina *baseline correction* de los datos de aceleración del registro del 29 de abril de 2017 (Tabla 3) utilizando los resultados del software Deepsoil® y los obtenidos de la codificación.

Uno de los problemas del programa de tratamiento de acelerogramas de USGS, es el cambio de la duración del registro al momento de truncar la señal en las intersecciones de cero, lo cual afecta el cálculo de las deformaciones cortantes de dos registros a diferentes profundidades, además de la de los efectos de truncamiento presentados en algunos registros. Por esto, algunos investigadores han propuesto la aplicación de ventanas a los registros en aceleración, y la aplicación de filtros pasa altos de mayor frecuencia de corte (Boore, 2005; Chandra, 2014).

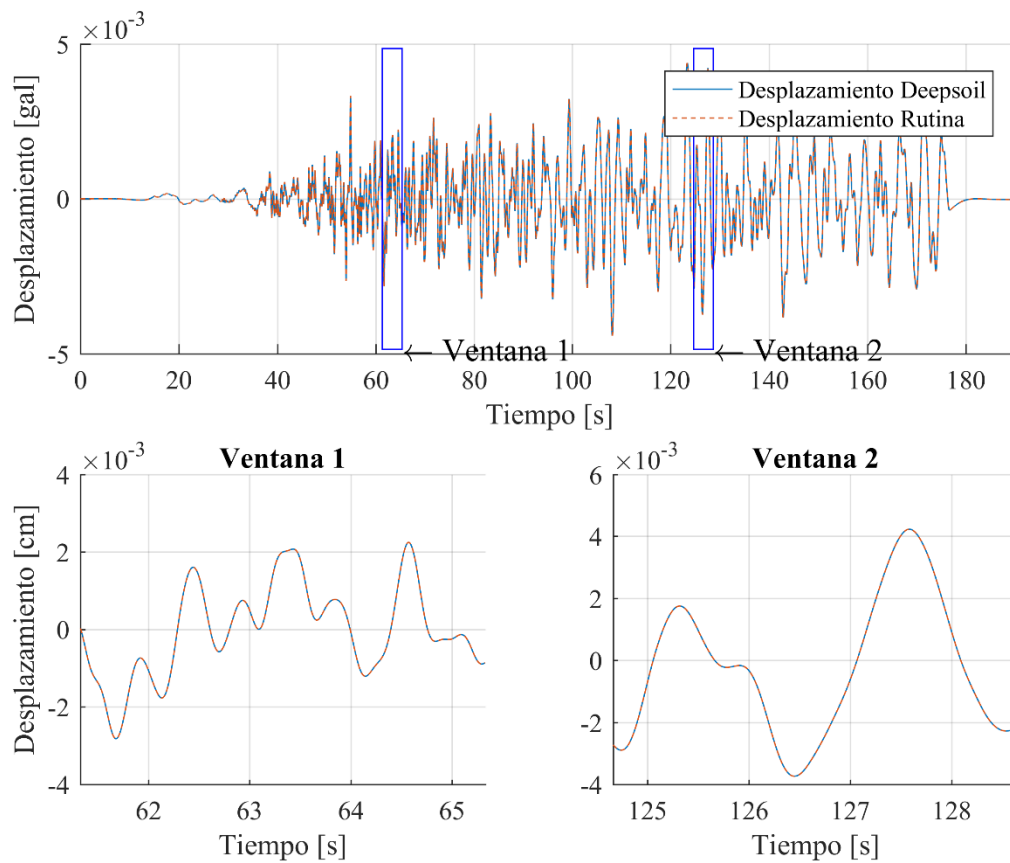


Figura 16. Datos de desplazamiento del registro en aceleración del 29 de abril de 2017 (Tabla 3) utilizando los resultados del software Deepsoil® y los obtenidos de la codificación.

De esta manera, la rutina de procesamiento de los registros en aceleración de esta investigación sigue los siguientes pasos:

1. Eliminar el promedio o la línea de tendencia de los datos.
2. Aplicar una ventana Tukey (*tapered cosine*) al 5%.
3. Incorporar a cada extremo del registro un vector de ceros de longitud igual a la definida en la Ecuación 5, en segundos, que corresponde al doble de la sugerida por USGS.
4. Aplicar un filtro pasa-banda *Butterworth* (*zero-phase shift*) con frecuencias de corte a 0.1 Hz y a 25 Hz.

A partir de los datos obtenidos del tratamiento, en este estudio se calculan los datos de velocidad y desplazamiento a partir de la integración numérica trapezoidal.

3.2.1.2. Cálculo de los parámetros de intensidad sísmicos

Los parámetros sísmicos de intensidad seleccionados para el análisis de las particularidades determinados para cada una de las componentes horizontales fueron el PGA, la deformación cortante γ y la Intensidad de Arias I_A .

PGA en superficie, en la base del depósito, en la base del estrato potencialmente licuable

Para esta investigación, se estimó la máxima aceleración absoluta en superficie, definida PGA en superficie, en la base del depósito de cada centro de monitoreo, denominada PGA en la base, y en la base del estrato potencialmente licuable, denominada PGA en la base del estrato licuable.

Intensidad de Arias – I_A

El cálculo de la Intensidad de Arias se definió para los registros de aceleración procesados con la rutina de tratamiento de señales, según la Ecuación 7, (Arias, 1970). La Intensidad de Arias es un parámetro que, al integrar todo el registro, permite contener información de todo el evento, además de considerar intrínsecamente las frecuencias definidas, por lo que es uno de los parámetros de intensidad que se consideran más invariantes en la caracterización de registros sísmicos, (Kayen & Mitchell, 1997).

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_o}^{t_f} a^2(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 7}$$

siendo $a(t)$ la historia de la respuesta de aceleración, y t_f el tiempo total del registro.

Deformación Cortante γ

Para la estimación de la deformación cortante, se estimó en primer lugar los desplazamientos de los registros de aceleración a través de una integración trapezoidal doble definida según la rutina de procesamiento. Posteriormente, según fuera el análisis, se calcularon las deformaciones cortantes

según lo descrito en la Ecuación 8, donde, γ_i representa la deformación cortante definida entre los acelerómetros $j + 1$ y j , no necesariamente continuos; d_{j+1} y d_j son los desplazamientos definidos por los acelerómetros $j + 1$ y j , respectivamente; y H_i es la diferencia de altura entre los acelerómetros en análisis.

$$\gamma_i = \frac{d_{j+1} - d_j}{H_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

Las tablas de los parámetros sísmicos de intensidad usados en este estudio para el centro WLA y GVDA se incorporan en los anexos.

3.2.2. Datos sismológicos

El dato sismológico integrado en la presente investigación fue la magnitud en escala Richter M_L , proporcionado para cada evento sísmico. Esto debido a que la magnitud sísmica se ha definido como uno de los parámetros de intensidad sísmica más populares. Asimismo, vale la pena señalar que aunque la base de datos de los centros de monitoreo no reportan valores para la magnitud de momento M_w , la cual es la más utilizada en la actualidad, es de esperarse que esta sea muy cercana a la magnitud en escala Richter M_L en esta investigación, ya que diversos autores reportan que estos valores son similares para $M_w \leq 6$ (Boore & Joyner, 1982; Campbell, 1985), que representa más del 98% de los sismos estudiados.

3.3. Evaluación de la incidencia de los parámetros sísmicos de intensidad en el inicio del exceso de la presión de poros

Para el análisis de la incidencia de los parámetros sísmicos de intensidad en el inicio del exceso de la presión de poros, se estimó el valor de los parámetros que tuvieran una mayor relación con el exceso de la presión de poros, estimando su valor correspondiente en el instante del incremento significativo

del exceso de la presión de poros. De esta forma, en la Figura 17 se muestra el flujo de trabajo para el desarrollo del tercer objetivo metodológico.

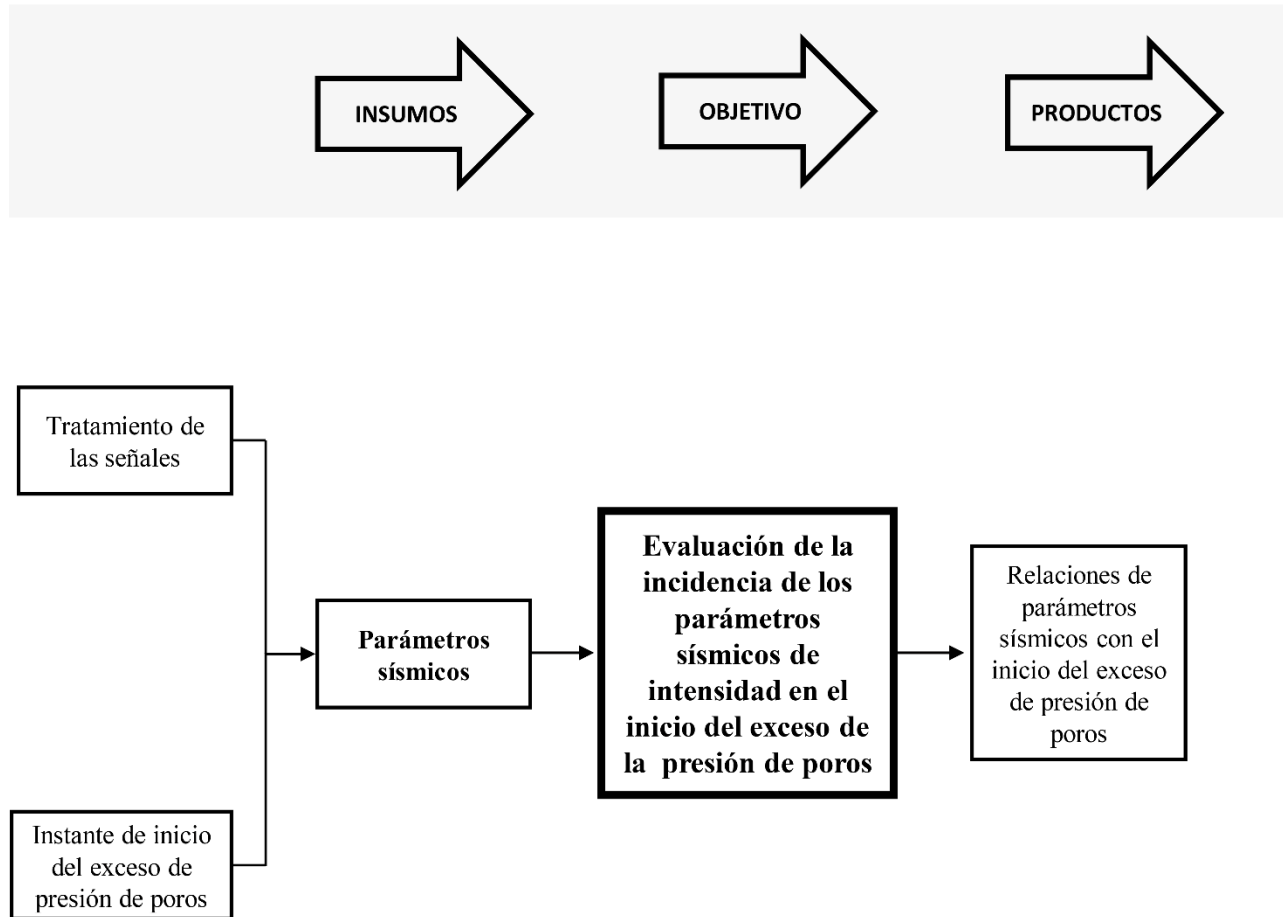


Figura 17. Flujo de trabajo del tercer objetivo metodológico.

3.3.1. Instante de inicio del exceso de la presión de poros

El inicio del exceso de la presión de poros se consideró como el instante en el que la razón del exceso de la presión de poros r_u alcanza el 0.5%, a partir de la cual es considerada como significativo (Sepúlveda-Guatecique, 2018). Así, con el fin de definir un análisis comparativo entre cada uno de los eventos sísmicos, se estableció un piezómetro de análisis para cada centro de monitoreo con el cual definir el instante de inicio del r_u . Esto último se realizó mediante un análisis estadístico con el

fin de determinar el piezómetro que primero alcanzara el 0.5% del r_u . En la Tabla 5 se muestran los códigos de los piezómetros definidos como *piezómetro de referencia* para cada uno de los centros de monitoreo.

Tabla 5. Piezómetros de referencia de los centros de monitoreo.

Centro de monitoreo	Piezómetro de referencia	Profundidad (m)
WLA	SB WLA HDD 60	2.5
GVDA	SB GVDA HDD 61	6.2

De esta forma, se presentaron registros sísmicos que no se tuvieron en cuenta en este análisis debido a que, a pesar de que llegaron a tener un r_u mayor al 0.5%, este no correspondía al piezómetro de referencia, el cual no llegaba a superar este umbral.

Capítulo 4.

Análisis de resultados

4.1. Selección de los registros sísmicos de los centros de monitoreo

4.1.1. Perfil de variación del nivel de aguas freáticas W_T

La curva de variación del nivel de aguas freáticas en el tiempo para los centros WLA y GVDA se presentan en la Figura 18 y la Figura 19, respectivamente, donde el nivel 0 m representa el nivel de superficie del depósito. En las figuras se puede notar que el rango de variación del nivel freático para el centro WLA está comprendido entre los 0.5 m y 2.5 m de profundidad, mientras que para el centro GVDA, este nivel varía entre 1.0 m y 3.5 m de profundidad.

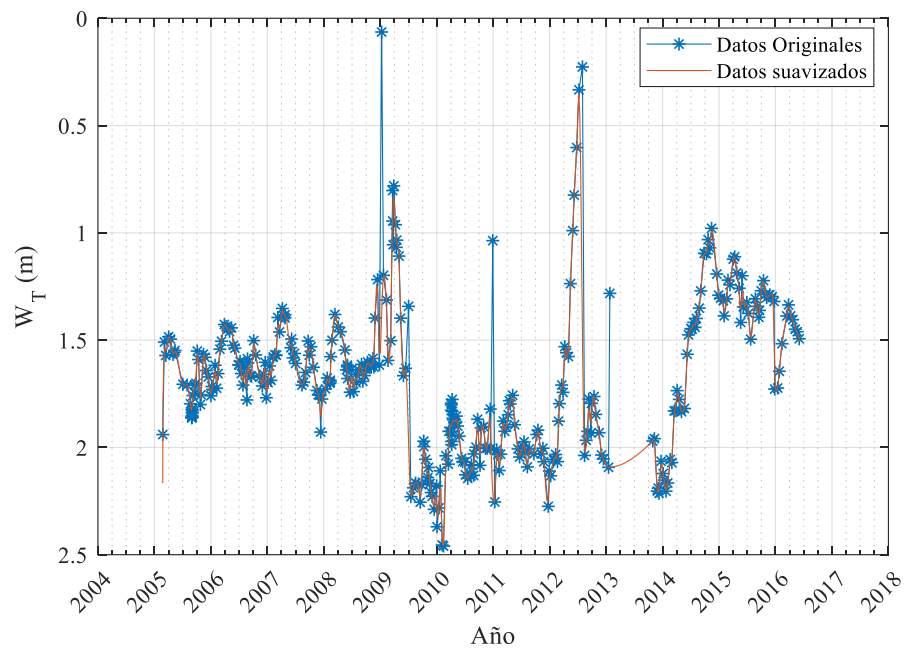


Figura 18. Curva de variación el nivel freático en el tiempo para el depósito de suelo del centro de monitoreo WLA.

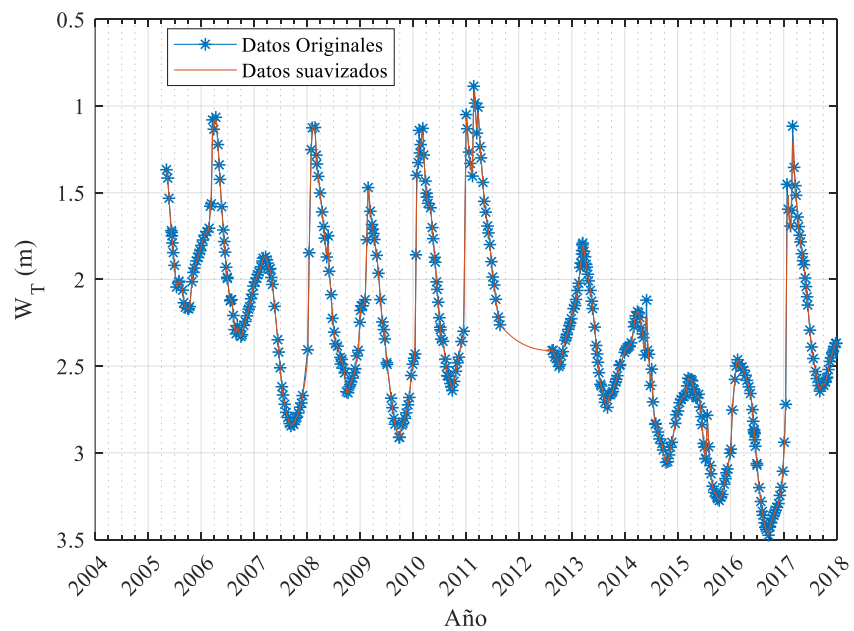


Figura 19. Curva de variación el nivel freático en el tiempo para el depósito de suelo del centro de monitoreo GVDA.

Debido a que los cambios del nivel de aguas freáticas varían en un rango muy definido anualmente para cada centro de monitoreo, se descartaron los datos que presentaban cambios repentinos, o que no tuvieron coherencia con los datos más cercanos, definiendo así una curva suavizada de variación del nivel de aguas freáticas para cada centro de monitoreo. Otro caso particular en la obtención de los datos es la ausencia de información en el año 2013 para el centro WLA, y entre 2011 y 2012 para el centro GVDA. No obstante, este hecho no afecta la investigación del exceso de la presión de poros ya que ningún evento definido con $(r_u)_{m\acute{a}x}$ mayor al 2% se presentó en estos intervalos de tiempo para cada uno de los centros de monitoreo.

4.1.2. Perfil geotécnico: Esfuerzos totales (σ)

Con base en los datos del perfil geotécnico disponibles del centro WLA, en la Tabla 6 se consignan los datos de variación de los esfuerzos totales para las profundidades correspondientes de cada uno de los piezómetros en función del nivel de aguas freáticas, además de la ecuación de la curva de tendencia. En la Figura 20 se grafican estos resultados.

Tabla 6. Valores de variación del esfuerzo total en función del nivel de aguas freáticas para las profundidades de cada uno de los piezómetros del centro de monitoreo WLA.

W_T	60 [2.64 m]	61 [2.95 m]	62 [3.28 m]	63 [3.51 m]	64 [4.40 m]	65 [4.73 m]	66 [6.23 m]
<i>m</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>	<i>kN/m²</i>
1.10	46.82	52.68	60.66	64.65	82.68	88.75	119.15
1.37	46.63	52.49	60.47	64.46	82.49	88.56	118.96
1.52	46.53	52.39	60.37	64.36	82.39	88.46	118.86
2.00	46.52	52.38	60.36	64.35	82.38	88.45	118.85
2.29	46.52	52.38	60.36	64.35	82.38	88.45	118.85
2.60	46.52	52.38	60.36	64.35	82.38	88.45	118.85
2.74	46.52	52.01	59.99	63.98	82.01	88.08	118.48
2.90	46.52	52.01	59.01	63.00	81.03	87.10	117.50
3.30	46.52	52.01	59.01	62.51	80.54	86.61	117.01
3.50	46.52	52.01	59.01	62.51	80.15	86.22	116.62
3.66	46.52	52.01	59.01	62.51	79.05	85.12	115.52
4.11	46.52	52.01	59.01	62.51	78.27	84.34	114.74
4.40	46.52	52.01	59.01	62.51	78.27	83.88	114.28
4.57	46.52	52.01	59.01	62.51	78.27	83.53	113.93
4.70	46.52	52.01	59.01	62.51	78.27	83.53	113.02

W_T m	60 [2.64 m] kN/m^2	61 [2.95 m] kN/m^2	62 [3.28 m] kN/m^2	63 [3.51 m] kN/m^2	64 [4.40 m] kN/m^2	65 [4.73 m] kN/m^2	66 [6.23 m] kN/m^2
Máx.	46.82	52.68	60.66	64.65	82.68	88.75	119.15
Mín.	46.52	52.01	59.01	62.51	78.27	83.53	113.02
Diferencia	0.30	0.67	1.65	2.14	4.41	5.22	6.13
Promedio	46.55	52.19	59.64	63.40	80.70	86.64	116.97
σ	0.08	0.23	0.71	0.94	1.83	2.04	2.15
Curva de Tendencia	$\sigma_{2.6m} = 46.55$	$\sigma_{2.9m} = 52.19$	$\sigma_{3.3m} = 0.0763W_T^2 - 0.9859W_T + 61.807$	$\sigma_{3.5m} = 0.0512W_T^2 - 1.0231W_T + 65.935$	$\sigma_{4.4m} = -0.3152W_T^2 + 0.3923W_T + 82.75$	$\sigma_{4.7m} = -0.4568W_T^2 + 1.0553W_T + 88.148$	$\sigma_{6.2m} = -0.5358W_T^2 + 1.4401W_T + 118.15$
R^2			0.808	0.827	0.934	0.967	0.977

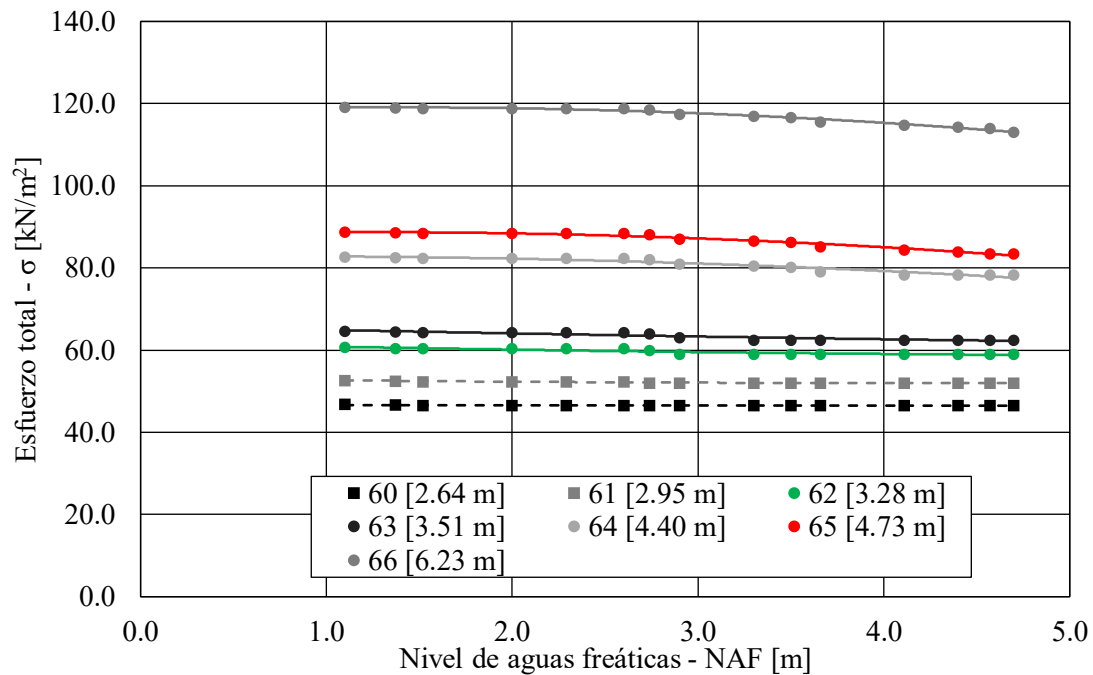


Figura 20. Variación del esfuerzo total en función del nivel de aguas freáticas para las profundidades de cada uno de los piezómetros del centro de monitoreo WLA.

En cuanto al centro de monitoreo GVDA, en la Tabla 7 se muestran los valores de los esfuerzos totales en las profundidades de cada uno de los piezómetros del centro de monitoreo GVDA.

Tabla 7. Valores de los esfuerzos totales en cada una de las profundidades de los piezómetros del centro de monitoreo GVDA.

<i>Código</i>	<i>Depth [m]</i>	<i>σ_v [kPa]</i>
60	3.5	56.9
61	6.2	81.89
62	8.8	105.75
63	10.1	117.84
65	14.4	159.3
70	4.3	64.04

4.1.3. Tamaño de la muestra

En la Figura 21 y la Figura 22 se muestra la población de eventos sísmicos para los centros WLA y GVDA, respectivamente, distribuidos según la distancia epicentral, la profundidad del evento y la magnitud M_L . Se puede notar que los eventos de menor magnitud son los que tienen un mayor número de ocurrencia; en contraste con el número de datos con M_L mayor a 5, el cual es demasiado bajo.

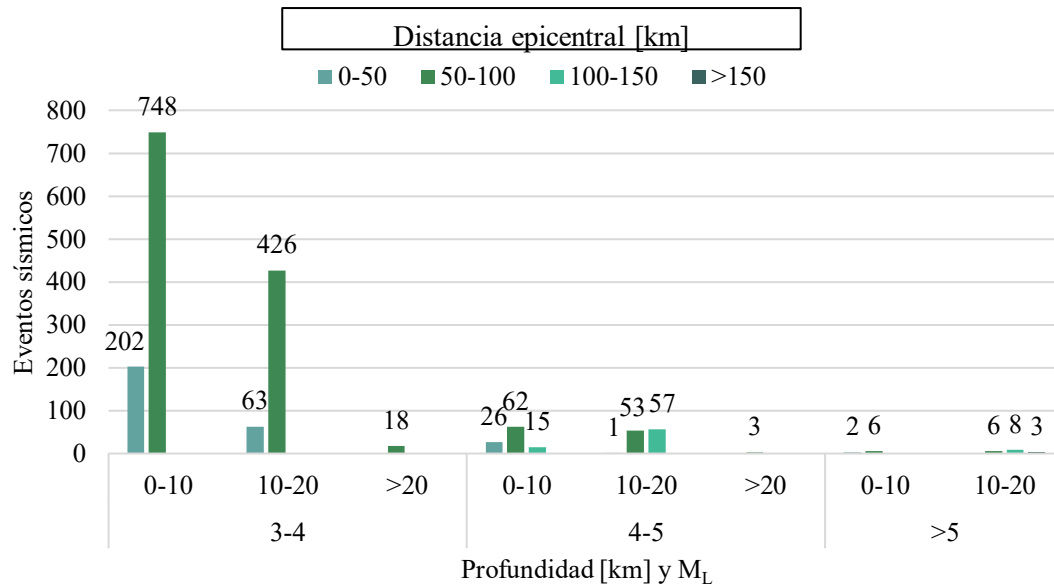


Figura 21. Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 registrados por WLA.

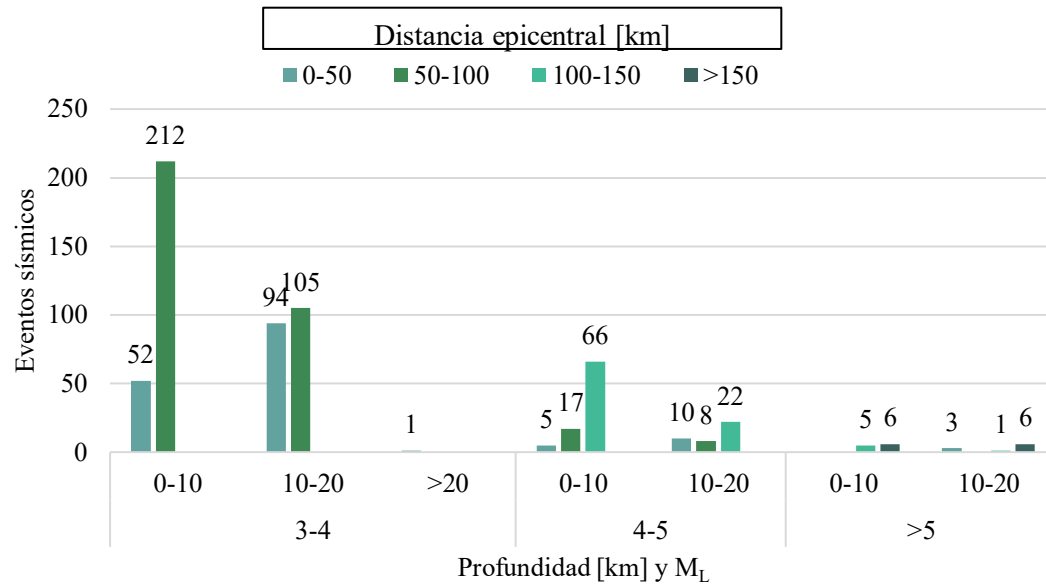


Figura 22. Eventos sísmicos con magnitudes mayores a 3.0 registrados por GVDA.

Aplicando el muestreo aleatorio estratificado según lo expuesto en el capítulo anterior, se obtuvo el tamaño de muestra relacionada en la Tabla 8 para los eventos que no presentan exceso de la presión de poros.

Tabla 8. Tamaño definido para los centros de monitoreo WLA y GVDA.

M_L	3-4	4-5	>5
WLA	42	36	19
GVDA	37	32	15

En cuanto a los eventos que presentaron exceso de la presión de poros, los eventos seleccionados para los centros WLA y GVDA fueron los que se muestran en la Tabla 9 y la Tabla 10, respectivamente.

Tabla 9. Registros sísmicos de WLA con *presión de poros considerable*.

Registro	Fecha (UTC)	Hora	M_L	Profundidad (km)	$(r_u)_{m\acute{a}x}$ (%)
1	31 de agosto de 2005	10:47:36 p. m.	4.5	4	4.3%
2	31 de agosto de 2005	10:50:14 p. m.	4.4	2	4.3%
3	1 de septiembre de 2005	1:50:10 p. m.	4.4	0	4.8%
4	2 de septiembre de 2005	1:27:09 a. m.	4.5	4.9	5.1%

5 (*)	30 de diciembre de 2009	6:48:59 p. m.	5.8	6	2.3%
6	4 de abril de 2010	10:40:47 p. m.	7.2	10	14.9%
7 (*)	15 de junio de 2010	4:26:56 a. m.	5.7	5.4	2.2%
8	26 de agosto de 2012	7:19:55 p. m.	4.5	4.7	4.6%
9	26 de agosto de 2012	7:31:13 p. m.	5.3	8.3	14.5%
10	26 de agosto de 2012	7:32:51 p. m.	4.8	4.3	7.0%
11	26 de agosto de 2012	7:40:04 p. m.	4.3	9.7	3.8%
12	26 de agosto de 2012	8:57:48 p. m.	5.4	8.2	12.9%
13	26 de agosto de 2012	9:15:19 p. m.	4.2	4.7	2.6%
14	26 de agosto de 2012	11:33:15 p. m.	4.6	7.4	51.9%
15	27 de agosto de 2012	4:41:27 a. m.	4.9	4.1	58.0%
16 (*)	28 de agosto de 2012	2:01:10 a. m.	4.2	4.4	2.8%

Tabla 10. Registros sísmicos de GVDA con *presión de poros considerable*.

Registro	Fecha (UTC)	Hora	M _L	Profundidad (km)	(r_u) _{máx} (%)
1 (†)	12 de junio de 2005	3:41:45 p. m.	5.2	14.2	10.16%
2	29 de julio de 2008	6:42:22 p. m.	5.3	14.7	2.18%
3	4 de abril de 2010	10:41:02 p. m.	7.2	10	5.60%
4	7 de julio de 2010	11:53:28 p. m.	5.4	14	12.84%
5	11 de marzo de 2013	4:55:59 p. m.	4.7	13.1	3.57%
6	6 de enero de 2016	2:42:30 p. m.	4.3	16.7	2.59%
7	10 de junio de 2016	8:04:33 a. m.	5.1	12.3	7.92%

De esta manera, en la Tabla 11 se consigna el tamaño de la muestra final para cada centro de monitoreo.

Tabla 11. Tamaño final de la muestra de los centros de monitoreo WLA y GVDA.

M _L	Sin exceso de presión de poros			Con exceso Poros	Total
	3-4	4-5	>5		
WLA	42	36	19	16	113
GVDA	37	32	15	7	91

* Eventos con exceso de la presión de poros considerable resultantes del análisis de r_u para los eventos descargados a partir del *muestreo aleatorio estratificado*.

† Evento sin datos del acelerómetro ubicado a 150 m de la superficie.

4.2. Estimación de las particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros

Con la finalidad de dar alcance al objetivo general de esta investigación, los resultados para cada centro de monitoreo (WLA y GVDA) que a continuación se presentan, se exponen gráficamente y en paralelo bajo dos escenarios de análisis: excluyendo los sismos con exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$) y teniendo en cuenta los sismos con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$). Lo anterior es debido a que las particularidades en la respuesta sísmica de suelos con estratos potencialmente licuables se evidencian cuando este estrato pierde de gran manera su rigidez a causa del aumento del exceso de la presión de poros (Holzer, et al., 1989; Zeghal & Elgamal, 1994; Pease & O'Rourke, 1997; Holzer & Youd, 2007). En consecuencia, si no se presenta aumento del exceso de la presión de poros, la respuesta sísmica del suelo se espera que sea similar a la de depósitos de suelo sin estratos potencialmente licuables.

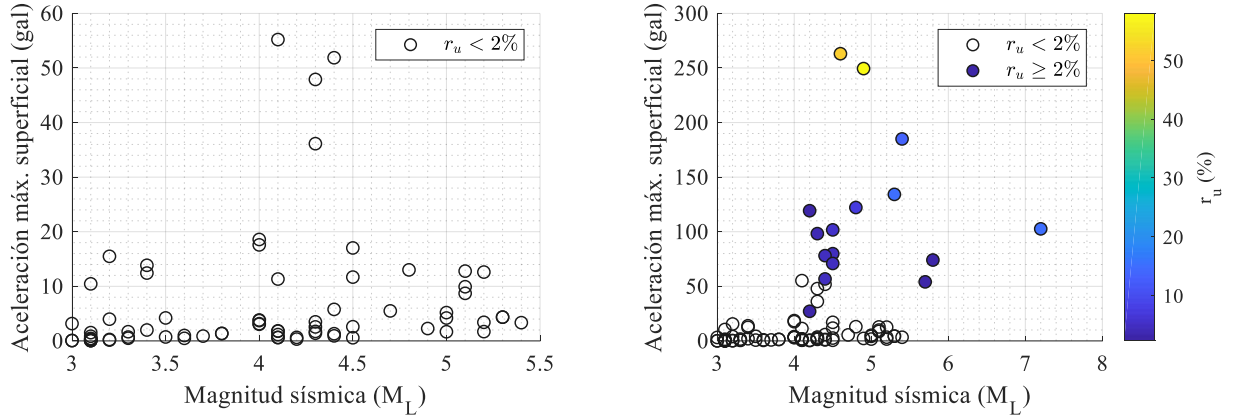
Asimismo, las gráficas presentadas en los siguientes análisis comparativos corresponden a solo una de las componentes horizontales de cada centro de monitoreo (norte-sur para WLA y este-oeste para GVDA). Las gráficas de las otras componentes, las cuales presentan una forma similar a las aquí presentadas, se encuentran en los Anexos.

4.2.1. Relación entre magnitud y aceleración máxima en superficie.

En la Figura 23 se muestran las relaciones entre la magnitud y el PGA en superficie para los centros de monitoreo WLA y GVDA, para los sismos sin exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$) y con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$). Se puede observar, tanto para WLA como para GVDA, que los eventos con $r_u < 2\%$, la magnitud y el PGA en superficie no presentan una relación o tendencia. Por otra parte, para los sismos con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$), se observa en WLA y GVDA una leve tendencia de aumento del PGA con la magnitud cuando $M_L \leq 5.5$; para magnitudes

mayores, el PGA decrece. Respecto a la razón de exceso de la presión de poros (r_u), en ambos centros de monitoreo el r_u aumenta a medida que aumenta el PGA.

WLA - NS



GVDA - EW

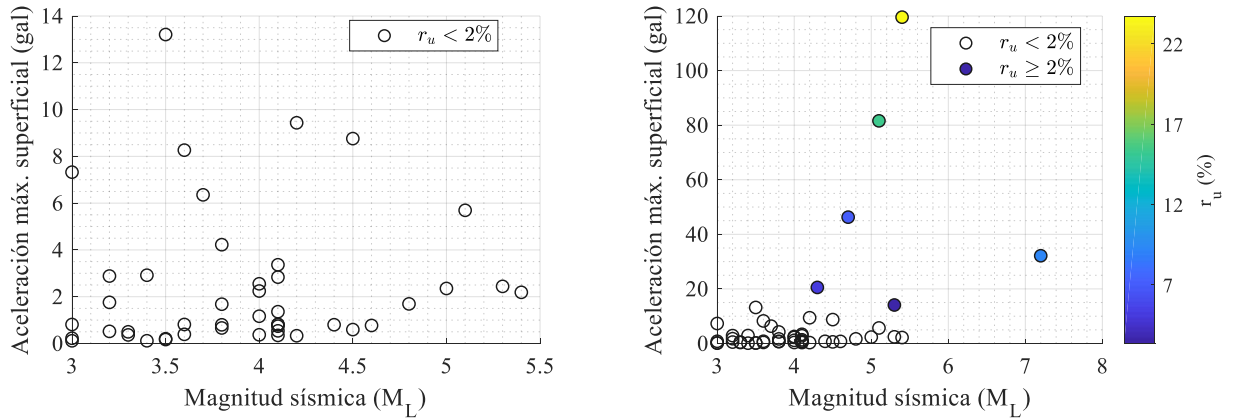


Figura 23. Relación de la magnitud sísmica M_L y el PGA en la superficie del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).

En esta investigación, se esperaba encontrar una tendencia entre la magnitud y el PGA para los sismos sin exceso de la presión de poros, ya que son dos parámetros que se correlacionan con frecuencia en estudios de amenaza sísmica. Ejemplo de ello son las curvas de atenuación, las cuales son modelos

de predicción de respuesta sísmica que correlacionan parámetros de movimiento fuerte, como la aceleración máxima superficial (PGA), con parámetros de caracterización del evento (Campbell, 1985; 1997). No obstante, el alcance del análisis acá presentado no puede ser concluyente ya que no fueron analizados los sismos de forma independiente según su tipo de falla y profundidad de origen.

Por otra parte, aunque para los sismos con exceso de la presión de poros sí parece existir una correlación entre estos parámetros, esta solo se presenta si la magnitud de los sismos es menor a 5.5. Asimismo, se debe tener en cuenta que los valores de la magnitud reportados en la Figura 23 mayores a 5.5 pueden no ser representativos, ya que la magnitud local o de Richter (M_L) es un parámetro que empieza a ser deficiente a partir de este rango (Boore & Joyner, 1982; Campbell, 1985). A pesar de esto, es importante, cuando se tenga mayor número de registros en los centros de monitoreo, que se siga estudiando esta correlación para los sismos con exceso de la presión de poros, ya que estos dos parámetros son fundamentales en los métodos de evaluación de potencial de licuación tradicionales, específicamente en la estimación de la demanda sísmica, la cual se representa en estos análisis mediante la relación de esfuerzos cíclicos (CSR por sus siglas en inglés) (Seed & Idriss, 1967; Boulanger & Idriss, 2014).

Asimismo, la relación del PGA y el r_u presentada en este trabajo para WLA coincide con los resultados presentados por El-Sekelly y otros, (2017). No obstante, en ese mismo estudio los investigadores definen que el umbral del PGA a partir del cual el r_u supera el 2% se encuentra entre 88 y 98 gal. De esta manera, de los resultados mostrados en la Figura 23 para el centro WLA, este umbral se supone conservador, ya que se descartan varios eventos que presentaron un r_u menor al 10%. En cuanto al centro GVDA, este umbral es extremadamente conservador, por lo que se puede estudiar un posible umbral para este centro de monitoreo a partir de los resultados presentados.

4.2.2. Relación entre la aceleración máxima en base y en superficie

En la Figura 24 se muestran las relaciones del PGA en la base y el PGA en superficie para los centros de monitoreo WLA y GVDA, para los sismos sin exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$), y con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$).

Para el caso de WLA, para los sismos sin exceso de la presión de poros, se puede apreciar que existe una relación lineal entre el PGA en la base y el PGA en superficie, tal como se evidencia con la línea de tendencia de los datos, en color azul. En este caso, la amplificación del PGA es de un orden un poco mayor a 2, con lo cual es posible estimar, para el rango de aceleración mostrado en los resultados, la respuesta sísmica del PGA en superficie para cierto PGA en la base. Es importante señalar que el sensor en la base en WLA se encuentra a 100 m de profundidad, alejado a 900 m del basamento, aproximadamente, por lo que se espera que este factor de amplificación sea mucho mayor si se toma como referencia el sismo en roca. Por otra parte, para el caso en el que los eventos presentaron exceso de la presión de poros, esta relación lineal tiende a mantenerse para valores del PGA en la base menores a 40 *gal*. No obstante, después de este nivel de aceleración la relación tiende a ser cuadrática, curva roja, con lo que la razón de cambio del PGA en superficie respecto al PGA en la base decrece constantemente.

Para el caso del centro GVDA, al igual que en el centro WLA, para los sismos sin exceso de la presión de poros, la relación del PGA en la base y el PGA en superficie es lineal, línea de tendencia azul, con un factor de amplificación aproximadamente igual a 5, mucho mayor que el caso de WLA, aspecto que era de esperarse teniendo en cuenta que el sensor en la base si se encuentra en roca. De esta misma manera, en los casos en los que se evidenció exceso de la presión de poros, dicho comportamiento lineal tiende a conservarse (línea roja).

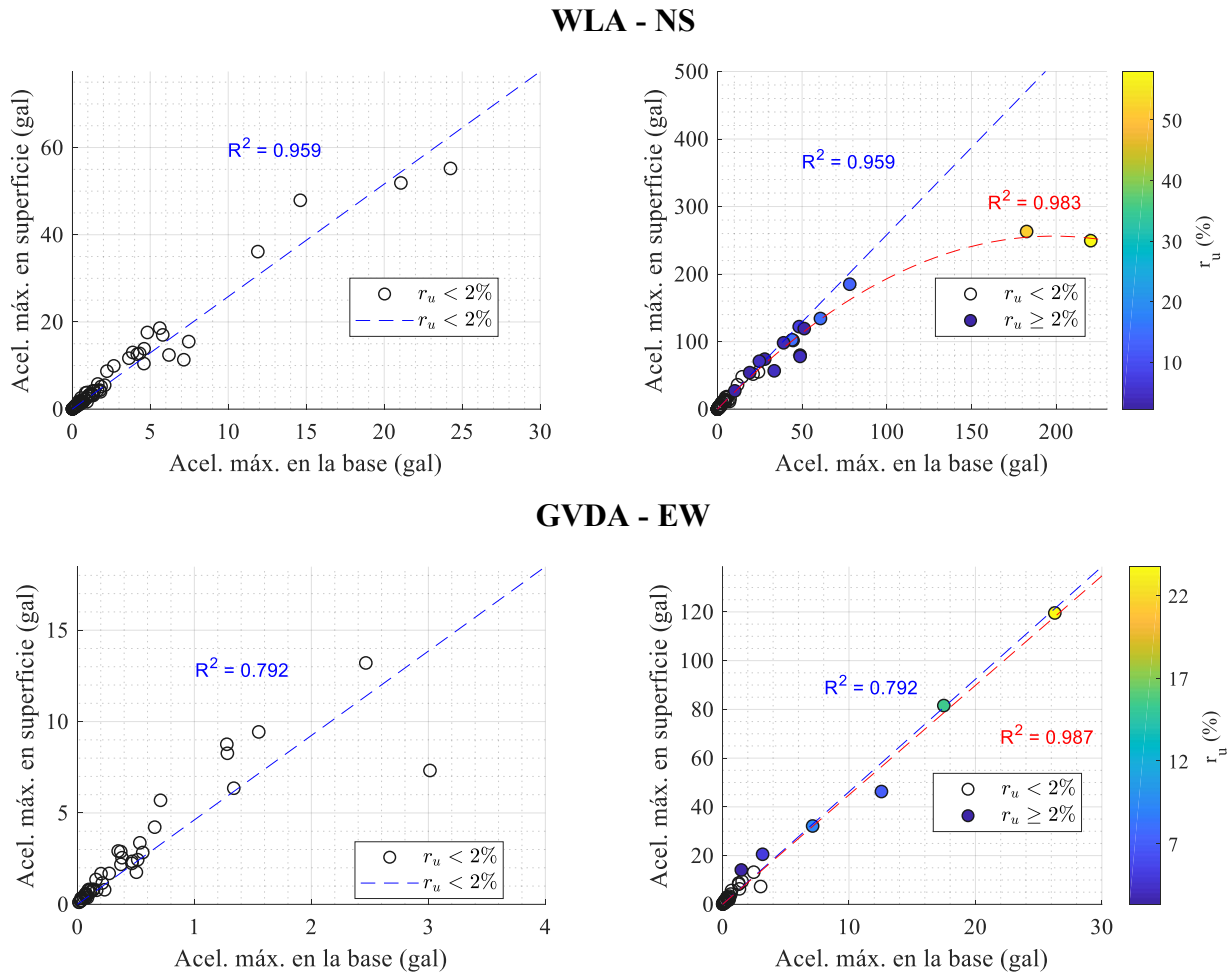


Figura 24. Relación de la aceleración máxima en la base del depósito, PGA en la base, y la aceleración máxima en superficie, PGA en superficie, del centro de monitoreo WLA en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).

En ambos centros de monitoreo se evidencia que la razón del exceso de la presión de poros aumenta a medida que aumenta el PGA en la base, lo que sugiere una relación de la sollicitación del evento con el aumento del exceso de la presión de poros en el estrato potencialmente licuable. En contraste, no se observa una correlación clara entre el aumento de la presión de poros con el PGA en superficie, ya que para el centro de monitoreo WLA la relación decrece de manera cuadrática, mientras que en el centro GVDA dicha relación se conserva lineal. No obstante, es necesario tener en cuenta entre estas diferencias de comportamiento dos aspectos importantes para futuros estudios:

- i. El PGA en base del centro GVDA no supera los 40 gal, que fue la sollicitación sísmica en WLA donde la relación entre PGA en la base y en superficie dejó de ser lineal.
- ii. Dada la pérdida de linealidad en WLA, es posible pensar que la respuesta sísmica de ambos depósitos está definida por las condiciones del sitio de acuerdo con su rigidez y no por el aumento del exceso de la presión de poros. De acuerdo con Seed y otros (1976), la amplificación del PGA en superficie respecto a la roca depende de la rigidez del depósito de suelo, tal como se muestra en la Figura 25, donde se puede observar una relación lineal para suelos rígidos y cuadrática para suelo blandos. Bajo este contexto, la velocidad de onda cortante promedio para WLA hasta el sensor en la base es de 250 m/s , que es característico de un suelo blando; mientras que para GVDA es de 560 m/s , que es característico de un suelo rígido.

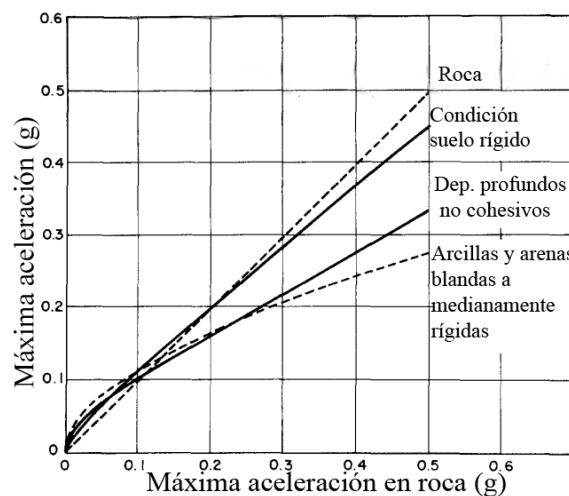


Figura 25. Relaciones aproximadas entre la máxima aceleración en roca y las condiciones de sitio. Adaptado de Seed y otros (1976).

4.2.3. Relación entre la aceleración máxima en base del estrato licuable y en superficie

En la Figura 26 y la Figura 27 se presentan las razones del PGA en superficie en la base del estrato potencialmente licuable para los sismos sin exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$) y con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$), para los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente, en cada una de sus componentes. Para WLA (Figura 26) se puede observar que las razones del PGA, para las dos componentes horizontales, no presentan variación significativa, es decir no hay amplificación o de-amplificación cuando hay exceso de la presión de poros. Esto se evidencia en el rango intercuartil, ya que coinciden para los casos con y sin aumento significativo del exceso de la presión de poros. Estos mismos resultados se presentan en el centro de monitoreo GVDA (Figura 27), donde los diagramas de cajas evidencian que la razón del PGA no cambia con el aumento del exceso de la presión de poros. De esta manera, es posible establecer que para los depósitos de suelo de los centros de monitoreo WLA y GVDA, no existe una relación demarcada entre el exceso de la presión de poros y el PGA en la superficie del depósito de suelo.

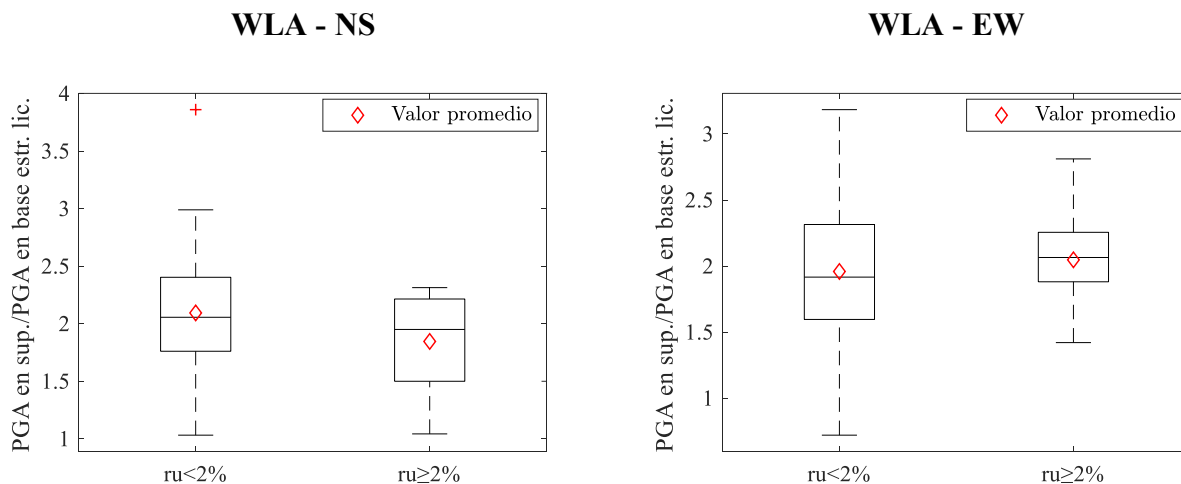


Figura 26. Diagrama de cajas de la razón del PGA en superficie y en la base del estrato potencialmente licuable, para el centro de monitoreo WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

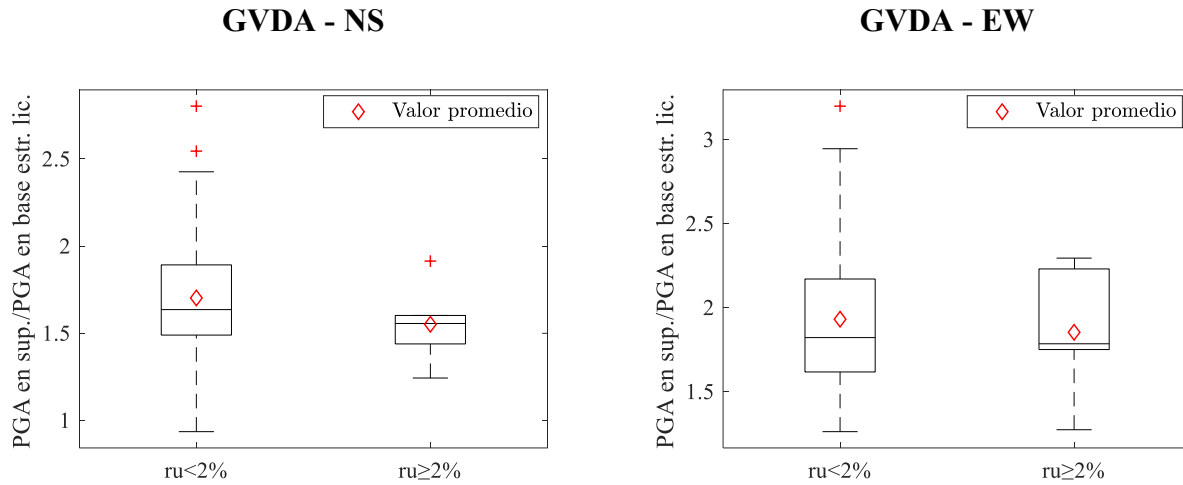


Figura 27. Diagrama de cajas de la del PGA en superficie y en la base del estrato potencialmente licuable, para el centro de monitoreo GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

Sin embargo, estos resultados contradicen lo sugerido por Bouckovalas y otros (2017), quienes plantearon que, al aumentar el exceso de la presión de poros, el estrato potencialmente licuable sufre una pérdida de rigidez, llegando a comportarse, por lo tanto, como un aislador sísmico que reduce la amplificación del PGA en superficie. Como pudo evidenciarse, la pérdida de rigidez, que puede representarse en el aumento de la razón de exceso de la presión de poros (r_u), no generó una amplificación o de-amplificación significativa en los centros de monitoreo analizados.

4.2.4. Relación entre la aceleración y la deformación cortante máxima

En la Figura 28 se muestra la relación entre la máxima deformación cortante del depósito de suelo y la aceleración máxima en la base del depósito, PGA en la base, para los centros de monitoreo WLA y GVDA, según los sismos sin exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$) y con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$). Para los sismos sin exceso de la presión de poros puede observarse, tanto para WLA y GVDA, una gran dispersión de los datos, aunque con una relación creciente general.

Para los datos con $r_u \geq 2\%$ del centro WLA, se puede notar que la dispersión de los datos permanece, pero con la misma relación creciente; no obstante, para el centro GVDA, los datos con exceso de la presión de poros muestran que la tasa de variación disminuye a medida que el PGA en la base aumenta, evidenciando, además, una tendencia a permanecer constante, tal como se muestra con la curva de tendencia en rojo para el sentido este – oeste.

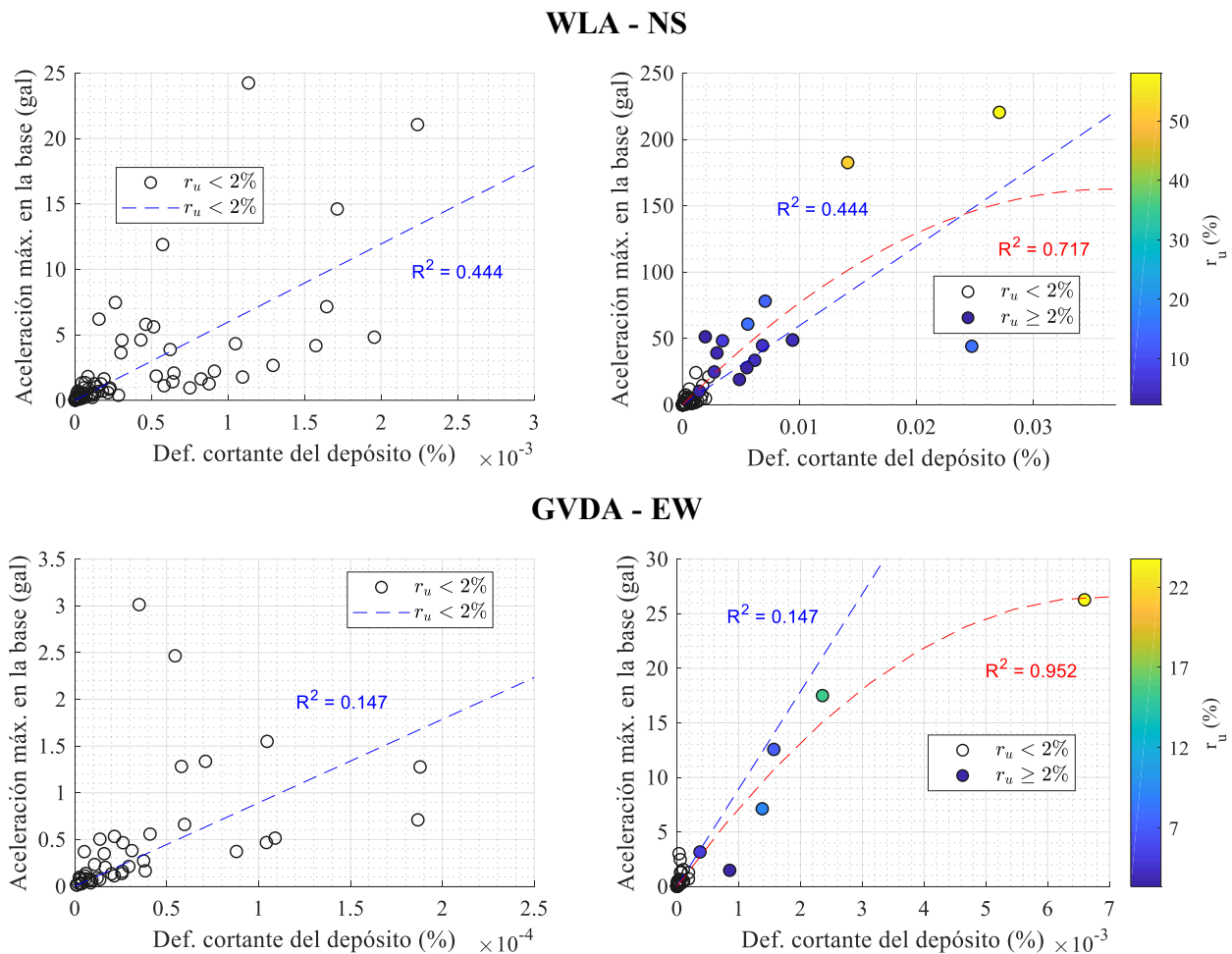


Figura 28. Relación entre la deformación cortante máxima del depósito y la aceleración máxima en la base del depósito, PGA en la base del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).

En la Figura 29 se muestran las relaciones del PGA en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable para los centros de monitoreo WLA y GVDA, para los sismos sin exceso de la presión de poros ($r_u < 2\%$) y con exceso de la presión de poros ($r_u \geq 2\%$). Para el caso de los eventos sin exceso de la presión de poros, tanto para WLA y GVDA se puede notar que la deformación cortante del estrato potencialmente licuable es directamente proporcional con el PGA en la base de este, llegando a presentar un grado mucho menor de dispersión respecto a los resultados presentados en la Figura 28 para todo el depósito.

Por otra parte, al analizar los casos con exceso de la presión de poros para los centros de monitoreo, según las curvas de tendencia roja, se observa que la relación lineal se pierde a medida que aumenta la deformación y la razón de exceso de la presión de poros. Asimismo, si se realiza un símil con una curva típica esfuerzo-deformación de una arena suelta, como la mostrada en la Figura 30, parece que el suelo potencialmente licuable a cierto nivel de aceleración y razón del exceso de la presión de poros, empieza a comportarse como un plástico perfecto (estado crítico), que tiende a deformarse indefinidamente sin necesidad que aumente las solicitaciones de carga. En este contexto, el estrato licuable en GVDA es más susceptible a presentar grandes deformaciones bajo una menor demanda sísmica en la base del estrato licuable.

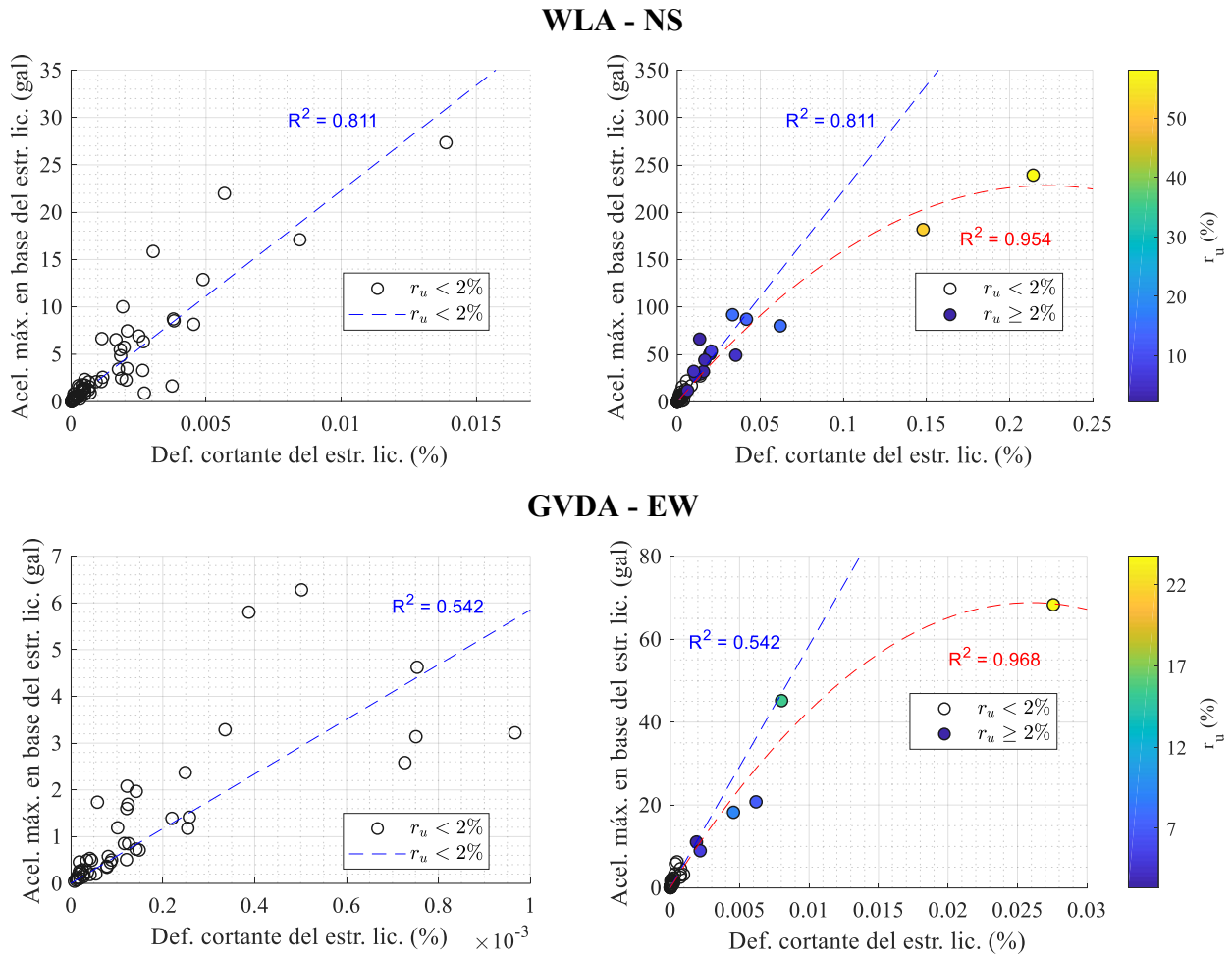


Figura 29. Relación entre la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable y la aceleración máxima en la base del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).

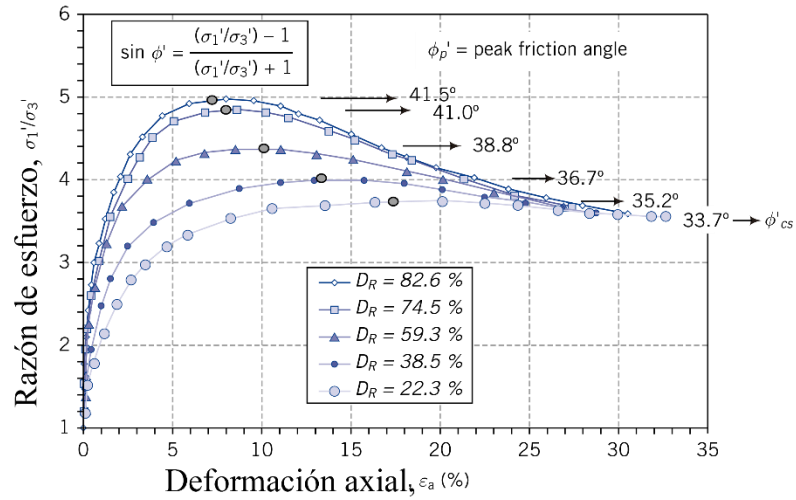


Figura 30. Resultados de esfuerzo – deformación obtenidos a partir de ensayos triaxiales en arenas, donde D_R es la densidad relativa. Adaptado de Budhu (2015).

4.2.5. Relación entre la intensidad de Arias y la deformación máxima del estrato licuable

En la Figura 31 se muestra la relación entre la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable y la deformación cortante del mismo. A partir de esta, se puede notar que para el centro WLA la tasa de cambio aumenta de forma constante, para los casos con $r_u < 2\%$, a medida que crece la deformación cortante. No obstante, para los casos en los que se presentaron los mayores aumentos del exceso de la presión de poros, la Intensidad de Arias no aumenta según la deformación cortante, sino que tiende a permanecer constante. Asimismo, para el centro GVDA, es posible determinar que el crecimiento en la tasa de variación para los datos con $r_u < 2\%$ disminuye drásticamente cuando el estrato presenta un aumento de las deformaciones cortantes.

A pesar de que no se evidencia el mismo comportamiento definido con las relaciones del PGA en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante del mismo, se puede notar que el aumento del exceso de la presión de poros es creciente, en términos generales, con la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable. No obstante, como se puede notar en la Figura

31, en algunos casos no se evidencia una relación directa ya que, a medida que el exceso de la presión de poros aumenta, la Intensidad de Arias no lo hace con la misma proporción.

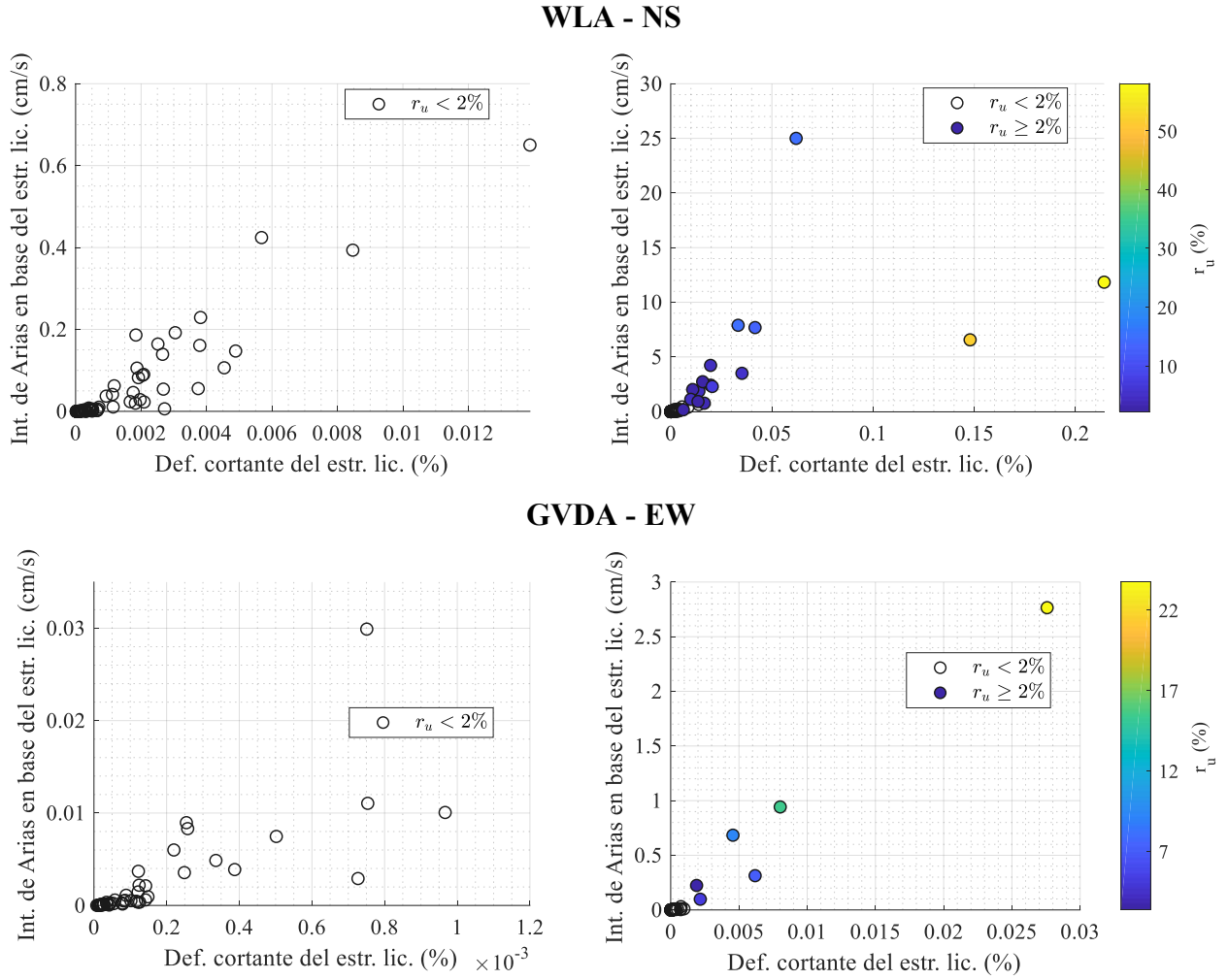


Figura 31. Relación entre la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable del centro de monitoreo WLA, en la componente norte-sur (NS), y del centro de monitoreo GVDA en la componente este-oeste (EW).

Además de esto, si se toma la Intensidad de Arias como un parámetro de solicitación del estrato potencialmente licuable, se puede notar que, a medida que el exceso de la presión de poros aumenta,

la deformación cortante lo hace de forma proporcional. Esto sugiere que, si el exceso de la presión de poros aumenta, de igual forma lo hará la deformación cortante del estrato potencialmente licuable.

4.3. Evaluación de la incidencia de los parámetros sísmicos de intensidad en el inicio del exceso de la presión de poros

El análisis estadístico realizado para definir el piezómetro de referencia se muestra en la Figura 32 y la Figura 33 para cada uno de los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente. Como se puede notar, para cada depósito de suelo la probabilidad de ocurrencia para el piezómetro superior del estrato potencialmente licuable es mucho mayor que para los demás casos, alcanzando a superar el 65% de probabilidad. De esta manera, para cada centro de monitoreo se seleccionó el piezómetro ubicado en la parte superior del estrato potencialmente licuable para la estimación del instante cuando $r_u = 0.5\%$.

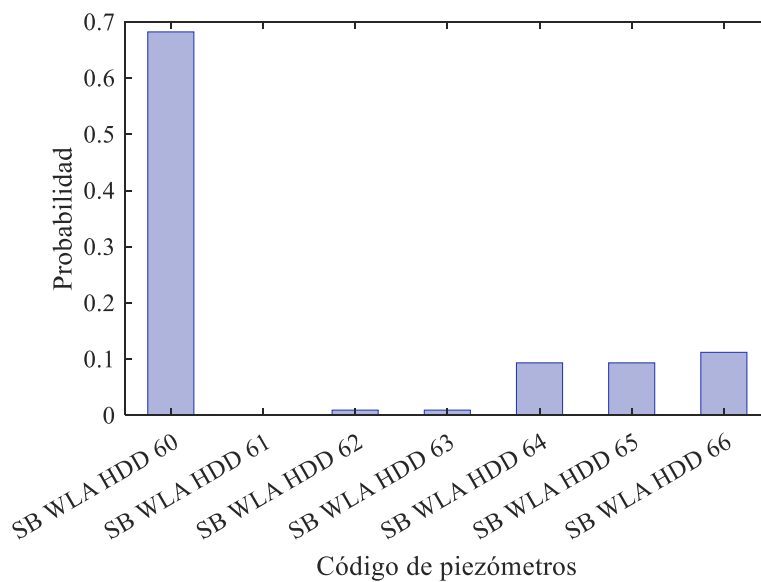


Figura 32. Distribución de probabilidad para el piezómetro con el menor tiempo de ocurrencia de $r_u = 0.5\%$ en el centro WLA.

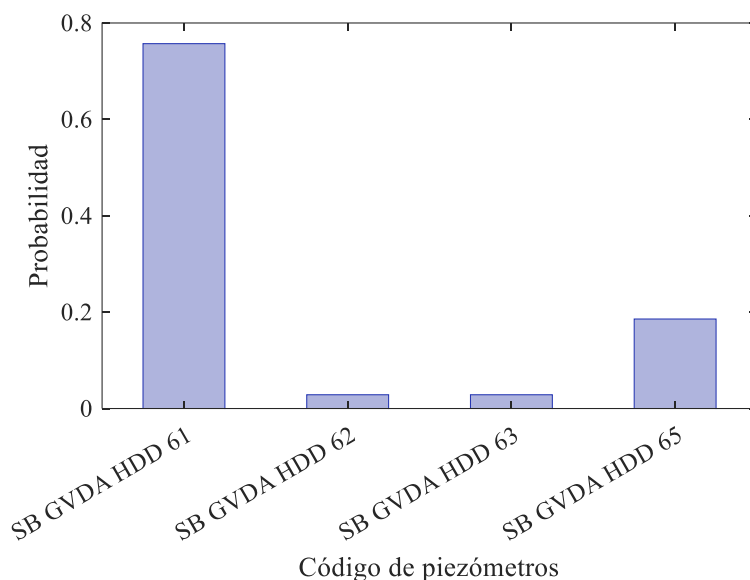


Figura 33. Distribución de probabilidad para el piezómetro con el menor tiempo de ocurrencia de $r_u = 0.5\%$ en el centro GVDA.

Los resultados anteriores sugieren, además, que el desarrollo del inicio del exceso de la presión de poros se da en la parte superior del estrato potencialmente licuable, punto que corresponde con el nivel de menor esfuerzo efectivo vertical σ' . Por lo cual, si la excitación en el estrato potencialmente licuable experimenta solicitaciones dinámicas como sismos, es posible suponer de forma general que el desarrollo del exceso de la presión de poros se dará en la zona con menor esfuerzo efectivo.

4.3.1. Parámetros sísmicos

Con base en el análisis de la respuesta sísmica a partir de las relaciones de los parámetros sísmicos de intensidad, se pudo determinar una relación de la deformación cortante del estrato potencialmente licuable y la Intensidad de Arias en la base de este, con el nivel del exceso de la presión de poros. De la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable, se evidenció que, a medida que esta aumenta, el nivel del exceso de la presión de poros lo hace de igual forma; por lo que estos resultados sugieren que la intensidad de Arias, como parámetro del nivel de energía que excita el estrato potencialmente licuable, es un parámetro que puede no sólo incrementar el exceso de la presión

de poros, sino también causar que este se inicie o se “dispare”. De igual forma, al analizar la deformación cortante del estrato potencialmente licuable, se puede encontrar la misma relación, con lo cual es posible que, para cierto nivel de deformación cortante, el exceso de la presión de poros inicie de igual manera. De esta manera, se calculan la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable y la deformación cortante de este en el instante de ocurrencia en el que la razón r_u es igual a 0.5%, los cuales se muestran en los anexos.

4.3.2. Relaciones del análisis del inicio del exceso de la presión de poros

Para determinar si los parámetros de Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable y la deformación cortante máxima de este determinan el inicio o “disparo” del aumento del exceso de la presión de poros, se calculó su valor en dos instantes, el primero cuando la razón del exceso de la presión de poros alcanza el 0.5%, mientras que el segundo, determinado solo para los eventos donde el r_u máximo fue menor a 0.5%, en el instante en el que estos parámetros alcanzaron el valor máximo. La hipótesis formulada, por lo tanto, es la siguiente: si existe un umbral para alguno de estos parámetros, el cual defina el aumento del exceso de la presión de poros, dicho valor en este instante de inicio debe ser mayor que el valor máximo correspondiente a los casos en los que los eventos presentaron un r_u máximo inferior a 0.5%. De esta manera, en la Figura 34 y la Figura 35 se muestran los diagramas de cajas para la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable en los instantes definidos, para los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente. Asimismo, en la Tabla 12 se muestran los valores de la mediana según el conjunto de datos.

Tabla 12. Valores de la mediana de los datos de Intensidad de Arias según el caso de análisis.

Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable (cm/s)				
Caso	En instante de $r_u=0.5\%$		IA máxima	
Dirección	N-S	E-W	N-S	E-W
WLA	2.40E-03	2.82E-03	1.40E-03	1.30E-03
GVDA	2.20E-03	1.87E-03	1.68E-04	2.26E-03

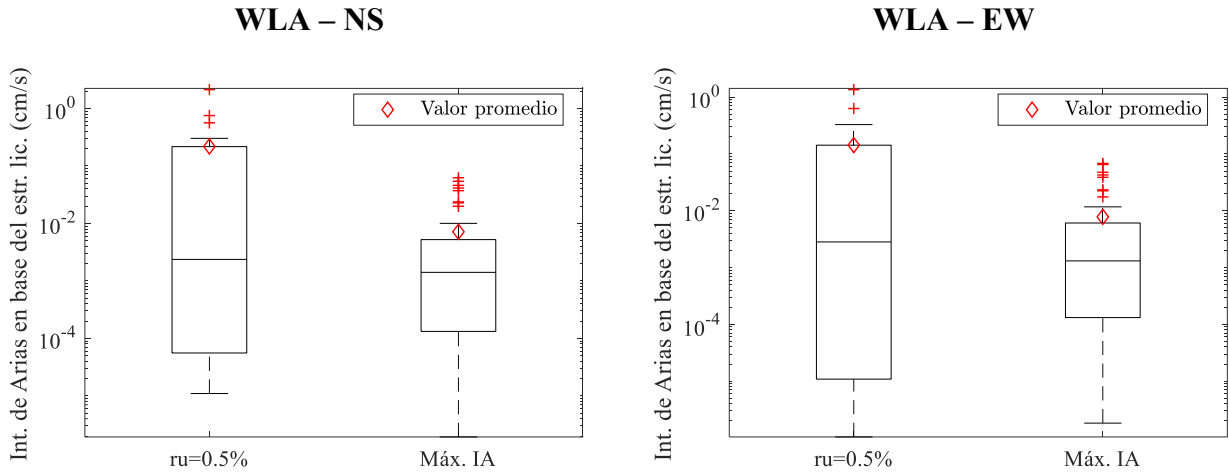


Figura 34. Diagrama de cajas de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable en el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable de los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

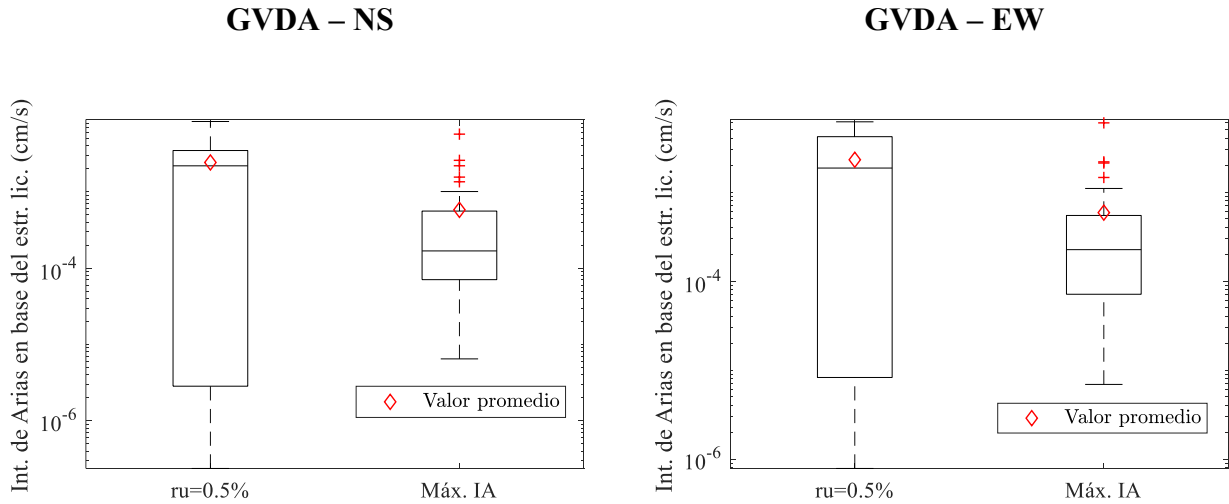


Figura 35. Diagrama de cajas de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable en el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable de los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

En el centro WLA, en los diagramas se puede notar que los cuartiles 1 y 3 de Intensidad de Arias máximo de los eventos que presentaron $r_u < 0.5\%$ están comprendidos en el rango de cuartiles 1 y 3 de los datos de Intensidad de Arias en el instante de $r_u = 0.5\%$, pero con valores un poco mayores en el segundo grupo de datos. Para el caso del centro GVDA, ocurre el mismo fenómeno con los casos de $r_u < 0.5\%$ y los valores en el instante de $r_u = 0.5\%$, incluyendo el caso en el que los datos correspondientes a este último grupo de datos son levemente mayores. Este hecho sugiere que los valores de Intensidad de Arias para estos depósitos de suelo al no superar los valores de Intensidad de Arias en el instante de $r_u = 0.5\%$, e incluso, al ubicarse levemente por debajo de estos, evidencian la existencia de una relación entre el inicio del exceso de la presión de poros con la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable.

Este resultado es coherente con lo reportado por Kayen y Mitchell (1997), en un estudio donde los autores proponen una metodología para evaluar el potencial de licuación con base en la Intensidad de Arias. En este, los investigadores concluyen que existe una correlación del aumento del exceso de la presión de poros con la Intensidad de Arias. Asimismo, Kramer y Mitchell (2006) al estudiar el comportamiento del exceso de la presión de poros con el potencial de licuación a través de modelos numéricos, concluyeron que el potencial de licuación sí está relacionado con la intensidad de Arias.

Por otra parte, en la Figura 36 y la Figura 37 se muestran los diagramas de cajas de las deformaciones cortantes máximas del estrato potencialmente licuable en los instantes definidos, para el centro WLA y GVDA, respectivamente. Asimismo, en la Tabla 12 se muestran los valores de la mediana según el conjunto de datos.

Tabla 13. Valores de la mediana de los datos de deformación cortante según el caso de análisis.

Deformación cortante del estrato potencialmente licuable (%)				
Caso	En instante de $r_u = 0.5\%$		γ máxima	
	N-S	E-W	N-S	E-W
WLA	1.30E-03 %	1.69E-03 %	2.77E-04 %	3.10E-04 %
GVDA	2.77E-04 %	3.20E-04 %	3.55E-06 %	4.97E-05 %

Para el caso de WLA, es posible observar que, para ambas componentes, la mediana y la media de la deformación cortante máxima hasta el instante de ocurrencia de $r_u = 0.5\%$ superan el valor máximo del conjunto de datos con $r_u < 0.5\%$ definido por el bigote del diagrama, lo cual sugiere una cota superior de deformación cortante a partir de la cual inicia el aumento del exceso de la presión de poros.

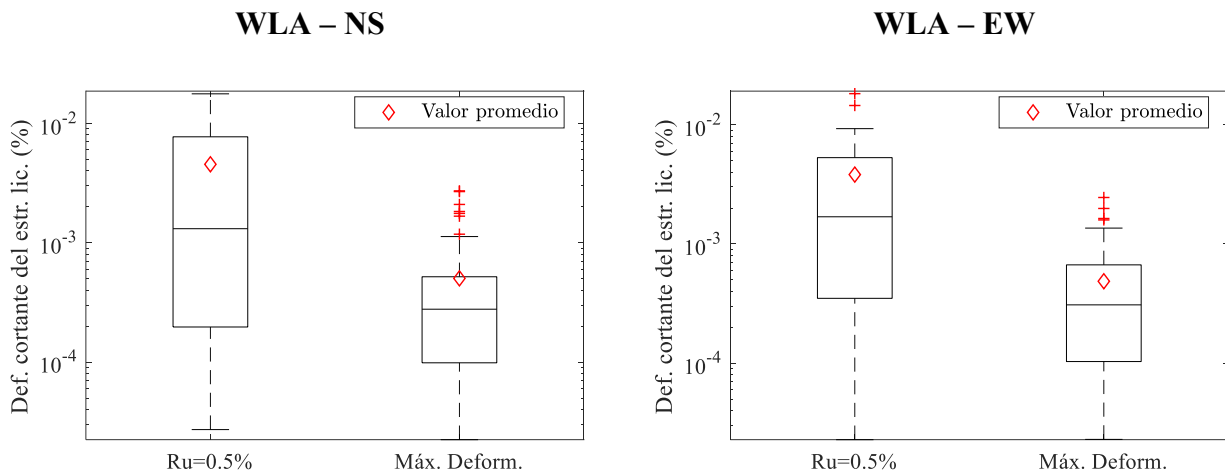


Figura 36. Diagrama de cajas de la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable hasta el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable de los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

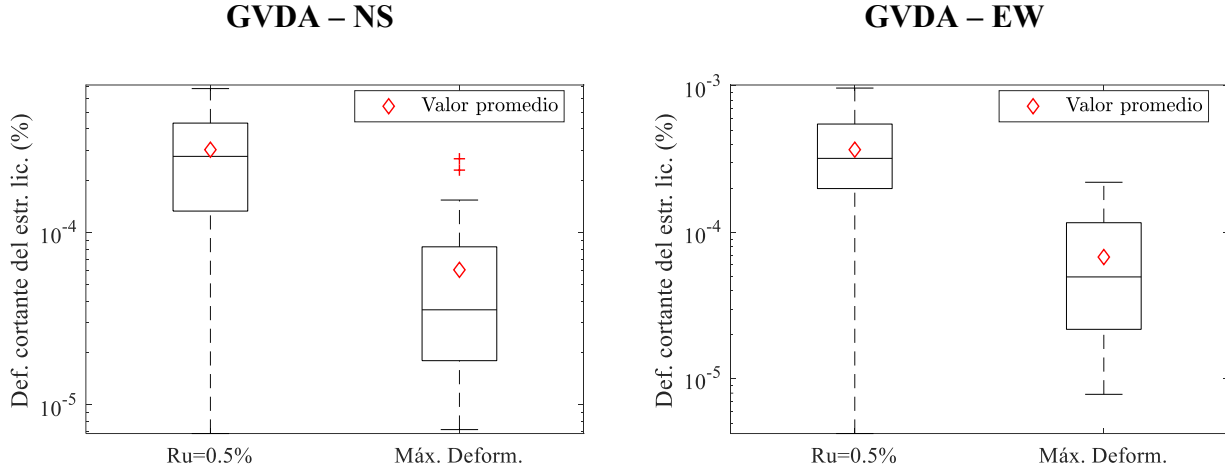


Figura 37. Diagrama de cajas de la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable hasta el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la deformación cortante máxima del estrato potencialmente licuable de los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

Este mismo hecho se observa para el centro GVDA, llegando el primer cuartil a ubicarse inclusive sobre el valor máximo de los datos con $r_u < 0.5\%$, definido por el bigote del diagrama. Este resultado sugiere que la deformación cortante puede considerarse como un parámetro de medición del umbral a partir del cual se genera un aumento del exceso de la presión de poros, para los depósitos de suelo en estudio. No obstante, esta hipótesis debe ser estudiada mucho más a fondo.

La existencia de un umbral definido por la deformación cortante a partir del cual inicia el exceso de la presión de poros fue sugerida por primera vez por Dobry y otros (1982), a partir de ensayos triaxiales cíclicos. Este concepto fue retomado por Dobry y Abdoun (2015), quienes compararon diferentes ensayos triaxiales cíclicos (Whitman, 1985), ensayos de campo (Cox, 2006) y experimentos de centrífuga, concluyendo que a partir de un nivel de la formación cortante igual a 0.01% inicia el exceso de la presión de poros. Este umbral se encuentra dentro del rango de deformación presentado en este estudio para WLA para los sismos con exceso de la presión de poros, pero sobreestima lo ocurrido en GVDA, donde el rango de deformación cuando de $r_u = 0.5\%$ es mucho menor.

Asimismo, con el fin de poder estudiar más allá la relación de estos parámetros con el inicio del exceso de la presión de poros, se graficaron los dos parámetros de intensidad en los instantes mencionados. En la Figura 38 y la Figura 39 se muestran estas relaciones para los centros de monitoreo WLA y GVDA, respectivamente, en las dos componentes.

Para el centro WLA, los resultados muestran que todos los datos medidos en el instante de $r_u = 0.5\%$, se ubican sobre los datos máximos para los eventos con r_u máximo menor a 0.5% , donde, además, se muestra una tendencia para ambos grupos de datos, presentando una tasa de variación similar para los datos de la componente norte – sur; mientras que para la componente este – oeste la tasa es menor para los datos en el instante de $r_u = 0.5\%$. Otro aspecto relevante es que, a partir de cierto nivel de deformación cortante e intensidad de Arias, todos los datos tienen un $r_u \geq 0.5\%$, dado que solo los eventos con $r_u \geq 0.5\%$ presentan los valores más altos.

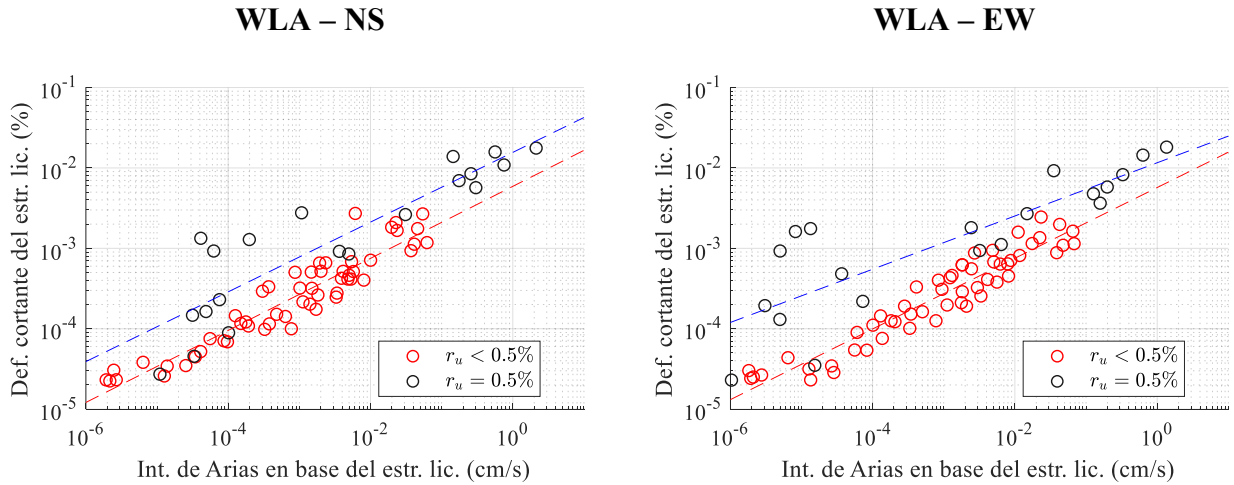


Figura 38. Relación de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este hasta el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este para los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro WLA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

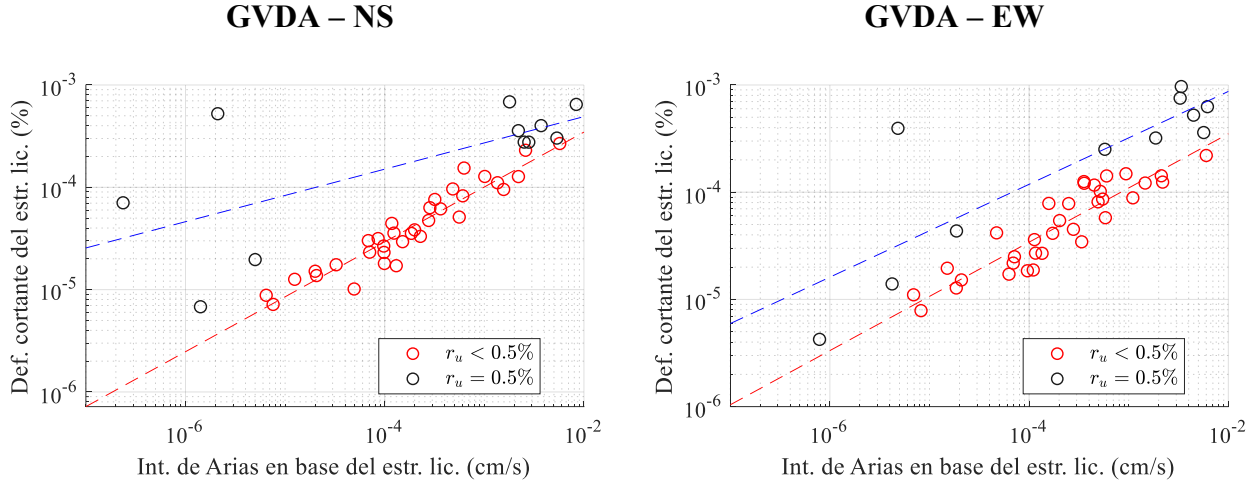


Figura 39. Relación de la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este hasta el instante de ocurrencia del $r_u = 0.5\%$, y la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación cortante máxima de este para los casos con $r_u < 0.5\%$; para el centro GVDA, en las componentes norte – sur (NS), y este – oeste (EW).

Por otra parte, para el centro GVDA, es posible observar, de igual forma, que los datos medidos en el instante de $r_u = 0.5\%$, se ubican sobre los datos máximos para los eventos con r_u máximo menor a 0.5% . Estos resultados sugieren que puede existir una función o curva que define el umbral, a partir del cual, con la combinación de los parámetros de Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable y la deformación cortante del mismo, inicia el exceso de la presión de poros según las condiciones del depósito de suelo.

Capítulo 5.

Conclusiones y recomendaciones

La respuesta sísmica de depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales ha sido ampliamente estudiada en los últimos 40 años, a través del estudio de registros de la respuesta sísmica en casos particulares, y con estudios de laboratorio (Dobry & Abdoun, 2015). No obstante, aún son considerados muchos de los resultados como hipótesis, debido a que no se han corroborado con registros de campo. Este hecho ha cambiado en las últimas décadas con la implementación de centros de monitoreo, que permiten definir la respuesta real de este tipo de depósitos, a partir de los cuales las hipótesis pueden ser verificadas. De esta manera, esta investigación aporta los datos de diferentes parámetros sísmicos de intensidad que representan la respuesta sísmica de dos depósitos de suelo con estratos potencialmente licuables no superficiales, los cuales permiten corroborar las investigaciones afines. De esta manera, después del análisis detallado de más de 1.800 registros de aceleración, y de más de 1.100 registros piezométricos correspondientes a los centros de monitoreo *Wildlife Liquefaction Array* (WLA), y *Garner Valley Downhole Array* (GVDA), se presentan a continuación las principales conclusiones de esta investigación:

5.1. Particularidades en el dominio del tiempo con y sin exceso de la presión de poros

Al relacionar el PGA en superficie, con la magnitud M_L y la razón del exceso de la presión de poros, se puede notar que la magnitud M_L no tiene una correlación directa en la respuesta del depósito de suelo, y tampoco con el nivel del exceso de la presión de poros. Sin embargo, es necesario en un

futuro re-evaluar esta correspondencia involucrando en el análisis la distancia del evento y el tipo de falla, tal como lo propone Campbell (1997) para la realización de curvas de atenuación.

Por otra parte, si se considera el PGA en superficie, los resultados muestran que a medida que este aumenta, el nivel de la razón del exceso de la presión de poros también lo hace. No obstante, al analizar la relación entre el PGA en superficie y el PGA en la base del estrato licuable, no se evidencia una influencia en los resultados de la razón del exceso de la presión de poros con la respuesta en PGA en superficie. Asimismo, esto contradice algunas investigaciones en las que se afirma que el PGA es un parámetro que se de-amplifica debido al efecto de la degradación del estrato potencialmente licuable por el aumento del exceso de la presión de poros.

Del análisis de la respuesta del depósito de suelo según la deformación cortante, se observa que este parámetro presenta una relación con el nivel de la razón del exceso de la presión de poros, sugiriendo que este sufre un incremento significativo debido a la disminución de la rigidez del estrato licuable al incrementarse el exceso de la presión de poros. Este hecho es coherente con investigaciones que sugieren que el aumento de la deformación cortante es debido a la degradación que experimenta el estrato potencialmente licuable durante el evento sísmico (Youd & Carter, 2005; Bouckovalas, et al., 2017).

Asimismo, de la relación del PGA en la base del depósito de suelo con la deformación del depósito de suelo, y del PGA en la base del estrato potencialmente licuable con la deformación del estrato potencialmente licuable, es posible determinar una misma tendencia en el comportamiento del suelo del depósito, por lo cual, es posible sugerir que la respuesta del depósito final, según la relación de esfuerzo - deformación cortante, está determinada por la respuesta del estrato potencialmente licuable. De igual manera, al comparar los resultados con ensayos triaxiales para arenas de baja densidad relativa, se puede suponer que el estrato potencialmente licuable empieza a presentar un comportamiento plástico a partir de cierto nivel de aceleración y razón de exceso de la presión de poros.

En cuanto al análisis de las relaciones de la Intensidad de Arias, es posible establecer que este parámetro tiene una correlación con el nivel del exceso de la presión de poros, por lo cual, el estrato

potencialmente licuable tendrá un mayor incremento del exceso de la presión de poros a medida que la energía de la onda sísmica se incrementa.

5.2. Relaciones del análisis del inicio del exceso de la presión de poros

Debido a las relaciones encontradas entre la deformación cortante del estrato potencialmente licuable, la intensidad de Arias en la base de este y la razón del exceso de la presión de poros, en esta investigación se estudiaron los efectos de estos parámetros de intensidad en el inicio del incremento del exceso de la presión de poros.

Del análisis, se pudo encontrar que, en el caso de la Intensidad de Arias, existe un valor común para los depósitos, definido por la mediana de los datos, a partir del cual se puede suponer un umbral de inicio del exceso de la presión de poros, el cual es $2.32 \times 10^{-3} \pm 3.99 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, debido a que la desviación estándar es baja. De esta forma, es posible incluso sugerir que la Intensidad de Arias es un parámetro que puede usarse en el desarrollo de investigaciones relacionadas con el inicio del exceso de la presión de poros, ya que presenta una varianza muy baja entre depósitos de suelos.

En cuanto al análisis de la deformación cortante, se pudo encontrar, según la mediana de los diagramas de cajas de los datos, que los depósitos de suelo presentan un umbral, ya que ninguno de los datos en los que se presentó una razón $r_u < 0.5\%$, superaron este valor. Además, al considerar el análisis de la estimación del piezómetro de referencia, donde se determinaron los piezómetros en los que ocurrió el primer “disparo” del exceso de la presión de poros, se puede verificar que la zona en la que inició el aumento del exceso de la presión de poros en la mayoría de los casos corresponde con la zona de mayor deformación cortante, según lo expuesto por Holzer y Youd (2007), para el centro WLA durante el sismo de *Superstition Hills*. Por lo tanto, existe gran evidencia de la existencia de un umbral definido por la deformación cortante del estrato potencialmente licuable, a partir del cual inicia el exceso de la presión de poros.

Por otra parte, si se analizan los datos de la mediana para el análisis de la deformación cortante con el inicio del exceso de la presión de poros, se pueden encontrar dos valores diferentes a partir del cual el exceso de la presión de poros se “dispara”. Esto puede deberse al hecho de que ambos presentan un comportamiento esfuerzo – deformación diferente, debido a, posiblemente, las condiciones geotécnicas del sitio. Por lo cual, la deformación cortante del estrato potencialmente licuable, como parámetro de determinación del inicio del exceso de la presión de poros puede variar según el depósito de suelo. De esta manera, con base en las relaciones entre el inicio del exceso de la presión de poros, la Intensidad de Arias en la base del estrato potencialmente licuable y la deformación cortante de este, se puede establecer una curva que relacione estos parámetros a partir de la cual se defina el umbral del inicio del exceso de la presión de poros, y no como parámetros independientes.

5.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

Debido a que en los últimos años se han incrementado las bases de datos de registros sísmicos para diversos centros de monitoreo sísmico, se recomienda realizar el análisis a otros depósitos de suelo con potencial de licuación, los cuales permitan contribuir a sentenciar las conclusiones aquí presentadas.

De igual manera, se deben incluir otros parámetros sísmicos de intensidad, los cuales permitan contribuir a un entendimiento mayor de la respuesta sísmica de este tipo de depósitos de suelo, como son los perfiles de aceleraciones máximas, de intensidad de Arias y deformaciones máximas que permitan entender cómo es la variación de la respuesta en todo el perfil del depósito, lo cual es de gran interés en la ingeniería estructural para estructuras o elementos estructurales que estén enterrados o inmersos en este tipo de depósitos de suelo. De igual manera, dentro de estos parámetros de intensidad se recomienda incluir parámetros de energía que han demostrado tener una mayor correlación con el exceso de la presión de poros, como son el CAV y el $CAV5$.

También se recomienda realizar un estudio de los efectos de los enjambres en la acumulación del exceso de la presión de poros, ya que se encontraron algunos en los que se presentaron incrementos en el exceso de la presión de poros considerables.

Otro aspecto es la definición del inicio del exceso de la presión de poros, ya que, según los resultados publicados por algunos investigadores, el umbral de deformación cortante a partir del cual se “dispara” el exceso de la presión de poros es mayor al encontrado en esta investigación (Dobry & Abdoun, 2015), demostrando que puede existir un nivel mucho más bajo de deformación a partir del cual inicie el exceso de la presión de poros.

Capítulo 6.

Bibliografía

Akkar, S. & Bommer, J. J., 2007. Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), pp. 511-530.

Alcaldía de Santiago de Cali, 2016. *Plan Local de Emergencias y Contingencias - Santiago de Cali*, Cali: Alcaldía de Santiago de Cali.

Arias, A., 1970. Measure of Earthquake Intensity. *Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile*.

Bennet, M. J., McLaughlin, P., Sarmiento, J. & Youd, T., 1984. *Geotechnical investigation of liquefaction sites, Imperial Valley, California*, s.l.: USGS Open File Report.

Boore, D. M., 2005. On Pads and Filters: Processing Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), pp. 745-750.

Boore, D. M. & Joyner, W. B., 1982. The empirical prediction of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6), pp. S43-S60.

Borcherdt, R. D., 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), pp. 29-61.

- Bouckovalas, G. D., Tsiapas, Y. Z., Zontanou, V. A. & Kalogeraki, C. G., 2017. Equivalent linear computation of response spectra for liquefiable Sites: the Spectral envelope method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), pp. 1-12.
- Bouckovalas, G. D., Tsiapas, Y. Z., Zontanou, V. A. & Kalogeraki, C. G., 2017. Equivalent Linear Computation of Response Spectra for Liquefiable Sites: The Spectral Envelope Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), pp. 1-12.
- Boulanger, R. W. & Idriss, I. M., 2014. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, Davis, California: Center for Geotechnical Modeling.
- Budhu, M., 2010. *Soil mechanics and foundations*. 3rd Edition ed. s.l.:John Wiley and Sons.
- Budhu, M., 2015. *Soil mechanics fundamentals*. 1st ed. Arizona, USA: Wiley Blackwell.
- Campbell, K. W., 1985. Strong Motion Attenuation Relations: A Ten-Year Perspective. *Earthquake Spectra*, August, 1(4), pp. 759-804.
- Campbell, K. W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*, January , 68(1), pp. 154-179.
- Chandra, J., 2014. *Nonlinear seismic response of the soil-structure system: experimental analyses*, Grenoble: Université de Grenoble. English.
- Converse, A. & Brady, A. G., 1992. *BAP basic strong-motion accelerogram processing software version 1.0*. Version 1.0 ed. s.l.:United States Department of the Interior, U.S. Geological Survey ; Distributed by Books and Open-file Reports Section.
- Cox, B. R., 2006. *Development of direct test method for dynamically assessing the liquefaction resistance of soils in situ*. Ph.D. thesis ed. Austin. TX.: Univ. of Texas.
- Díaz, J. A., 2005. *Dinámica de suelos*. Primera ed. Ciudad de México: Limusa.

- Dobry, R. & Abdoun, T., 2015. Cyclic Shear Strain Needed for Liquefaction Triggering and Assessment of Overburden Pressure Factor Kg. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141(11), p. 04015047.
- Dobry, R. y otros, 1982. *Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method*, Washington: U.S. Department of Commerce, Malcolm Bridge, Secretary.
- El-Sekelly, W., Dobry, R., T., A. & Steidl, J. H., 2017. Two case histories demonstrating the effect of past earthquakes on liquefaction resistance of silty sand.. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6).
- GeoLogismiki, Gregg Drilling Inc. & Robertson , P., 2018a. *CLiq – CPT soil liquefaction software*, s.l.: s.n.
- GeoLogismiki, Gregg Drilling Inc. & Robertson, P., 2018b. *CPeT-IT - CPT interpretation software*, s.l.: s.n.
- Hardin, B. O. & Drnevich, V. P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(SM7), pp. 667-692.
- Hashash, Y. M. A. y otros, 2018. *DEEPSOIL 7.0, User Manual*. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign: s.n.
- Havskov, J. & Ottemöller, L., 2010. *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Dordrecht, Netherland: Springer.
- Holzer, T. L., Hanks, T. C. & Youd, T. L., 1989. Dynamics of liquefaction during the 1987 superstition hills, california, earthquake. *Science*, Volumen 244, pp. 56-59.
- Holzer, T. L. & Youd, T. L., 2007. Liquefaction, Ground Oscillation, and Soil Deformation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 961-976.

- Holzer, T. L. & Youd, T. L., 2007. Liquefaction, Ground Oscillation, and Soil Deformation at the Wildlife Array, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(3), pp. 961-976.
- Idriss, I. M., 2008. *Soil liquefaction during earthquakes*. Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute.
- Ingeominas, Dagma, 2005. *Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali*, Bogotá: Ingeominas; Dagma.
- Kayen, R. E. & Mitchell, J. K., 1997. Assessment of Liquefaction Potential during Earthquakes by Arias Intensity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, December, 123(12), pp. 1162-1174.
- Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. First ed. New Jersey: Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Kramer, S. L., Hartvigsen, A. J., Sideras, S. S. & Ozener, P. T., 2011. *Site response modeling in liquefiable soil deposits*, Santa Barbara, EE.UU: 4th IASPEI/IAEE International Symposium.
- Kramer, S. L., Hartvigsen, A. J., Sideras, S. S. & Ozener, P. T., 2011. *Site Response Modeling in Liquefiable Soil Deposits*. San Barbara, 4th IASPEI/IAEE International Symposium.
- Kramer, S. L. & Mitchell, R. A., 2006. Ground Motion Intensity Measures for Liquefaction Hazard Evaluation. *Earthquake Spectra*, May, 22(2), pp. 413-438.
- Lambe, T. W. & Whitman, R. V., 1969. *Soil mechanics, SI version*. New York: Wiley.
- Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. M., 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. New York: Blackie Academic & Professional.
- Matasovic, N., 1993. *Seismic response of composite horizontally-layered soil deposit - Ph.D. Thesis*, Los Angeles: University of California.

- Murthy, T. G., Loukidis, D., Prezzi, M. & Salgado, R., 2007. Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, March, 57(3), pp. 273-288.
- Pease, J. W. & O'Rourke, T. D., 1997. Seismic Response of Liquefaction Sites. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1), pp. 37-45.
- Robertson, P. K. & Cabal, K. L., 2015. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. 6th ed ed. s.l.:Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, Inc..
- Schnabel, P. B., Lysmer, J. & Seed, H. B., 1972. *SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*, Berkeley: EERC - Report No. 72-12.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1967. Analysis of liquefaction: Niigata earthquake. *Proc., ASCE*, 93(SM3), pp. 83-108.
- Seed, H. B., Mararka, R., Lysmer, J. & Idriss, I. M., 1976. Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, August, 66(4), pp. 1323-1342.
- Sepúlveda-Guatecique, A. D., 2018. *Evolución del comportamiento licuable de depósitos granulares: Análisis del Wildlife Liquefaction Array - Tesis de maestría*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.
- Sierra, L. & Botero, E., 2014. *Influencia de la interacción suelo-estructura aplicado a un tramo subterráneo de la línea 12 del metro de la ciudad de México considerando el fenómeno de hundimiento regional*. Mexico, XXVII Reunión Nacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Steidl, J. H., Civilini, F. & Seale, S., 2014. *WHAT HAVE WE LEARNED AFTER A DECADE OF EXPERIMENTS AND MONITORING AT THE NEES@UCSB PERMANENTLY INSTRUMENTED FIELD SITES?*. Anchorage, Alaska, Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering.

Steidl, J. H., Nigbor, R. L. & Youd, T. L., 2008. *Observations of insitu soil behavior and soil-foundation-structure interaction at the George E. Brown, Jr. Network For Earthquake Engineering Simulation (NEES) permanently instrumented field sites*. Beijing, China, The 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Terzaghi, K., Peck, R. B. & Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

The Institute for Crustal Studies, UCSB, 2007. *WLA Instrumentation Guide*, s.l.: s.n.

The Institute for Crustal Studies, UCSB, 2008. *GVDA Instrumentation Guide*, s.l.: s.n.

Trifunac, M. & Brady, A. G., 1975. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), pp. 581-626.

UCSB; NEES, 2015. *The Earthquake Engineering Group; Earth Research Institute at UCSB*. [En línea]

Available at: <http://nees.ucsb.edu/>
[Último acceso: 18 07 2018].

Whitman, R. V., 1985. *Liquefaction of soils during earthquakes*. Washington, DC: Committee on Earthquake Engineering, National Research Council.

Wood, D. M., 1990. *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. First ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Yin, J., Nigbor, R. L., Chen, Q. & Steidl, J., 2016. Engineering analysis of measured rotational ground motions at GVDA. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volumen 87, pp. 125 - 137.

Youd, T. L. & Carter, B. L., 2003. *Influence of Soil Softening and Liquefaction on Response Spectra for Bridge Design*, Provo: Utah Department of Transportation Research and Development Division - Report.

- Youd, T. L. & Carter, B. L., 2005. Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), pp. 811-825.
- Youd, T. L. & Carter, B. L., 2005. Influence of Soil Softening and Liquefaction on Spectral Acceleration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), pp. 811-825.
- Youd, T. L. & Steidl, J. H., 2004. Lessons learned and need for instrumented liquefaction sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9-10), pp. 639-646.
- Zeghal, M. & Elgamal, A.-W., 1994. Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 996-1017.
- Zeghal, M. & Elgamal, A. W., 1994. Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6), pp. 996-1017.

Capítulo 7.

Anexos

En formato digital se presentan los anexos que se agrupan de la siguiente manera.

- Anexo 1. Tablas de parámetros sísmicos de intensidad de estudio.
- Anexo 2. Figuras de relaciones de parámetros sísmicos de intensidad para los centros de monitoreo WLA y GVDA, para las componentes en norte – sur (NS) y este – oeste (EW).